

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-089083

(43)Date of publication of application : 25.03.2003

(51)Int.Cl.

B25J 5/00
G01L 1/00

(21)Application number : 2002-039201

(71)Applicant : HONDA MOTOR CO LTD

(22)Date of filing : 15.02.2002

(72)Inventor : KAWAI MASAKAZU
IKEUCHI YASUSHI
KATO HISASHI

(30)Priority

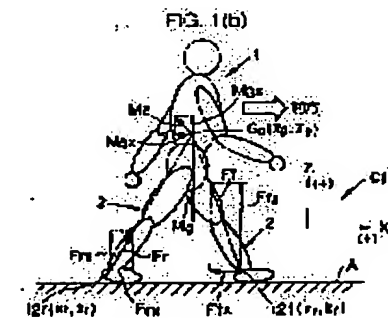
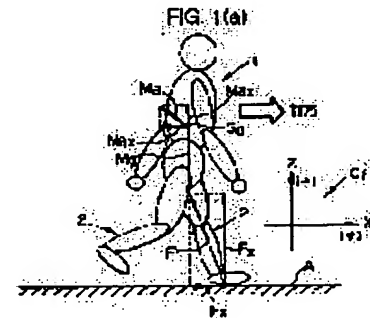
Priority number : 2001214174
2001 300815Priority date : 13.07.2001
27.06.2001

Priority country : JP

US

(54) METHOD FOR INFERRING FLOOR REACTION FORCE OF TWO LEG WALKING AND MOVING BODY AND METHOD FOR INFERRING REVOLUTE JOINT MOMENT OF TWO LEG WALKING AND MOVING BODY

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method capable of precisely grasping a floor reaction force acting on a leg body of a two leg walking and moving body such as a man and a moment acting on a joint of the leg body on real time by a comparatively simple method.**SOLUTION:** Whether a movement condition of the leg body 2 is in a single leg support condition or a both leg support condition is determined, and a floor reaction force F acting on the leg body 2 in contact with the ground is inferred based on a movement equation of center of gravity G_0 of the two leg walking and moving body 1 when the movement condition of the leg body 2 is in the single leg support condition. When the movement condition is in the both leg support condition, floor reaction forces F_r , F_f acting on respective leg bodies 2 are inferred based on the movement equation of the center of gravity G_0 of the two leg walking and moving body 1 and a relational equation between components of the floor reaction forces F_r , F_f of each leg body 2 and a position of an ankle part 12 of each leg body 2 for the center of gravity G_0 of the two leg walking and moving body 1.

LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

29.11.2004

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2003-89083
(P2003-89083A)

(43) 公開日 平成15年3月25日 (2003.3.25)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テ-マ-ト* (参考)
B 2 5 J 5/00		B 2 5 J 5/00	F 3 C 0 0 7
G 0 1 L 1/00		G 0 1 L 1/00	M

審査請求 未請求 請求項の数9 O L (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願2002-39201 (P2002-39201)

(22) 出願日 平成14年2月15日 (2002.2.15)

(31) 優先権主張番号 60/300,815

(32) 優先日 平成13年6月27日 (2001.6.27)

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(31) 優先権主張番号 特願2001-214174 (P2001-214174)

(32) 優先日 平成13年7月13日 (2001.7.13)

(33) 優先権主張国 日本 (JP)

(71) 出願人 000005326
本田技研工業株式会社
東京都港区南青山二丁目1番1号

(72) 発明者 河合 雅和
埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会
社本田技術研究所内

(72) 発明者 池内 康
埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会
社本田技術研究所内

(74) 代理人 100077805
弁理士 佐藤 辰彦 (外1名)

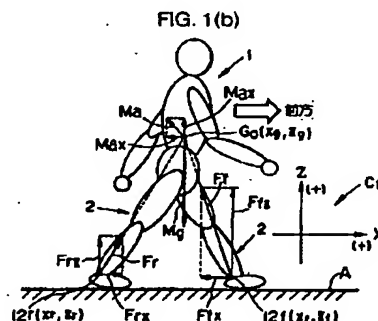
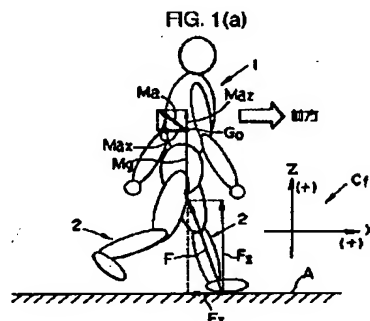
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 二足歩行移動体の床反力推定方法及び二足歩行移動体の関節モーメント推定方法

(57) 【要約】

【課題】 比較的簡単な手法で人間等の二足歩行移動体の脚体に作用する床反力や脚体の関節に作用するモーメントを精度よくリアルタイムで把握することができる方法を提供する。

【解決手段】 脚体2の運動状態が単脚支持状態であるか両脚支持状態であるかを判断し、単脚支持状態であるときには、二足歩行移動体1の重心G0の運動方程式に基づいて接地している脚体2に作用する床反力Fを推定する。両脚支持状態であるときには、二足歩行移動体1の重心G0の運動方程式と、各脚体2の床反力 F_r 、 F_f の成分と二足歩行移動体1の重心G0に対する各脚体2の足首部12の位置との間の関係式とに基づき各脚体2のそれぞれに作用する床反力 F_r 、 F_f を推定する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】二足歩行移動体の各脚体に作用する床反力を推定する方法であって、

前記二足歩行移動体の脚体の運動状態がその一方のみの脚体が接地している単脚支持状態であるか両脚体が接地している両脚支持状態であるかを判断する第1ステップと、前記二足歩行移動体の重心の位置を逐次求めつつ、該重心の位置の時系列データを用いて床に対して固定された絶対座標系での該重心の加速度を逐次求める第2ステップと、少なくとも前記両脚支持状態において各脚体の下端部近傍にあらかじめ定めた特定部位の前記重心に対する位置を逐次求める第3ステップとを備え、

前記二足歩行移動体の単脚支持状態であるときには、二足歩行移動体の重量と重力加速度と前記重心の加速度と接地している脚体に作用する前記床反力とにより表される該重心の運動方程式に基づき、接地している脚体に作用する前記床反力の推定値を逐次求め、

前記二足歩行移動体の両脚支持状態であるときには、二足歩行移動体の重量と重力加速度と前記重心の加速度と両脚体のそれぞれに作用する前記床反力とにより表される該重心の運動方程式と、各脚体に作用する前記床反力が該脚体の前記特定部位から前記重心に向かって作用すると仮定して定まる、各脚体の特定部位の前記重心に対する位置と該脚体に作用する前記床反力との間の関係式とに基づき両脚体のそれぞれに作用する前記床反力の推定値を逐次求めることを特徴とする二足歩行移動体の床反力推定方法。

【請求項2】前記各脚体の特定部位は、該脚体の足首部であることを特徴とする請求項1記載の二足歩行移動体の床反力推定方法。

【請求項3】前記両脚体上に各脚体の股関節を介して支持された胴体の股関節寄りの下部の上下方向の加速度を計測するステップを備え、前記第1ステップでは、前記胴体の下部の上下方向の加速度があらかじめ定めた所定の閾値以上に上昇した時に前記両脚支持状態が開始すると共に前記単脚支持状態が終了し、且つ、前記両脚支持状態で先行して離床する側の脚体に作用する前記床反力の推定値があらかじめ定めた所定の閾値以下に低下した時に前記両脚支持状態が終了すると共に前記単脚支持状態が開始すると、前記二足歩行移動体の運動状態を判断することを特徴とする請求項1又は2記載の二足歩行移動体の床反力推定方法。

【請求項4】前記両脚体上に各脚体の股関節を介して支持された胴体の傾斜角度と、各脚体の少なくとも股関節及び膝関節のそれぞれの屈曲角度と、前記二足歩行移動体のあらかじめ定めた基準点の前記絶対座標系における加速度とをそれぞれ計測するステップを備え、前記第2ステップでは、前記胴体の傾斜角度と、前記股関節及び膝関節のそれぞれの屈曲角度と、前記二足歩行移動体を複数の剛体の連結体として表してなる剛体リンクモデル

と、該剛体リンクモデルの各剛体に対応する二足歩行移動体の各剛体相当部のあらかじめ求めた重量と、各剛体相当部における該剛体相当部のあらかじめ求めた重心の位置とに基づき、前記基準点に対する前記二足歩行移動体の重心の位置を逐次求めると共に、その重心の位置の時系列データに基づき該基準点に対する該重心の加速度を逐次求め、その基準点に対する該重心の加速度と、前記絶対座標系における該基準点の加速度とから該絶対座標系での前記重心の加速度を求めることを特徴とする請求項1～3のいずれか1項に記載の二足歩行移動体の床反力推定方法。

【請求項5】前記基準点は、前記胴体に設定されていることを特徴とする請求項4記載の二足歩行移動体の床反力推定方法。

【請求項6】前記胴体は、前記両脚体に股関節を介して連結された腰部と、該腰部上に該腰部に対して傾斜可能に存する胸部とを有し、前記重心の位置を求めるために用いる前記胴体の傾斜角度は、前記腰部及び胸部のそれぞれの傾斜角度であることを特徴とする請求項4又は5記載の二足歩行移動体の床反力推定方法。

【請求項7】前記剛体リンクモデルは、前記二足歩行移動体の各脚体の膝関節の下側に存する下腿部と、該膝関節及び前記股関節の間の大腿部と、前記腰部と、該腰部の上側に存する前記胸部を含む上部とをそれぞれ剛体として表したモデルであることを特徴とする請求項6記載の二足歩行移動体の床反力推定方法。

【請求項8】請求項1～3のいずれか1項に記載の二足歩行移動体の床反力推定方法により逐次求めた前記各脚体に係る床反力の推定値を用いて前記二足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用するモーメントを推定する方法であって、

前記両脚体上に各脚体の股関節を介して支持された胴体の傾斜角度と、前記各脚体の少なくとも股関節及び膝関節のそれぞれの屈曲角度と、前記二足歩行移動体のあらかじめ定めた基準点の前記絶対座標系における加速度とをそれぞれ計測するステップと、前記胴体の傾斜角度と、前記各脚体の股関節及び膝関節のそれぞれの屈曲角度と、前記二足歩行移動体を複数の剛体の連結体として表してなる剛体リンクモデルとに基づき、該剛体リンクモデルの各剛体に対応する二足歩行移動体の各剛体相当部の傾斜角度を逐次求めるステップと、

前記各剛体相当部の傾斜角度と各剛体相当部のあらかじめ求めた重量と各剛体相当部における該剛体相当部のあらかじめ求めた重心の位置とに基づき、前記基準点に対する各剛体相当部の重心の位置の時系列データに基づき該基準点に対する各剛体相当部の重心の加速度を逐次求めるステップと、

該基準点に対する各剛体相当部の重心の加速度と、前記

絶対座標系における前記基準点の加速度とから該絶対座標系における各剛体相当部の重心の加速度を逐次求めるステップと、

前記各剛体相当部の傾斜角度の時系列データに基づき各剛体相当部の角加速度を逐次求めるステップと、

前記二足歩行移動体の剛体相当部としての各脚体の大腿部の傾斜角度と、該脚体の膝関節の屈曲角度とのうちの少なくとも一方に基づき該二足歩行移動体における各脚体の床反力作用点の推定位置を逐次求めるステップとを備え、

前記床反力の推定値と、前記床反力作用点の推定位置と、前記絶対座標系における各剛体相当部の重心の加速度及び該剛体相当部の角加速度と、各剛体相当部の傾斜角度と、各剛体相当部のあらかじめ求めた重量及びサイズと、各剛体相当部における該剛体相当部のあらかじめ求めた重心の位置と、各剛体相当部のあらかじめ求めた慣性モーメントとを用いて逆動力モデルに基づき前記二足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用するモーメントを推定することを特徴とする二足歩行移動体の関節モーメント推定方法。

【請求項9】請求項4～7のいずれか1項に記載の二足歩行移動体の床反力推定方法により逐次求めた前記各脚体に係る床反力の推定値を用いて前記二足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用するモーメントを推定する方法であって、

前記胴体の傾斜角度と、前記各脚体の股関節及び膝関節のそれぞれの屈曲角度と、前記剛体リンクモデルとに基づき、該剛体リンクモデルの各剛体に対応する二足歩行移動体の各剛体相当部の前記絶対座標系における傾斜角度を逐次求めるステップと、

前記各剛体相当部の傾斜角度と各剛体相当部のあらかじめ求めた重量と各剛体相当部における該剛体相当部の重心の位置とに基づき、前記基準点に対する各剛体相当部の重心の位置を逐次求めると共に、その各剛体相当部の重心の位置の時系列データに基づき該基準点に対する各剛体相当部の重心の加速度を逐次求めるステップと、

該基準点に対する各剛体相当部の重心の加速度と、前記絶対座標系における前記基準点の加速度とから該絶対座標系における各剛体相当部の重心の加速度を逐次求めるステップと、

前記各剛体相当部の傾斜角度の時系列データに基づき各剛体相当部の角加速度を逐次求めるステップと、

前記二足歩行移動体の剛体相当部としての各脚体の大腿部の傾斜角度と、該脚体の膝関節の屈曲角度とのうちの少なくとも一方に基づき該二足歩行移動体における各脚体の床反力作用点の推定位置を逐次求めるステップとを備え、

前記床反力の推定値と、前記床反力作用点の推定位置と、前記絶対座標系における各剛体相当部の重心の加速度及び該剛体相当部の角加速度と、各剛体相当部の傾斜

角度と、各剛体相当部のあらかじめ求めた重量及びサイズと、各剛体相当部における該剛体相当部のあらかじめ求めた重心の位置と、各剛体相当部のあらかじめ求めた慣性モーメントとを用いて逆動力モデルに基づき前記二足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用するモーメントを推定することを特徴とする二足歩行移動体の関節モーメント推定方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

10 【発明の属する技術分野】本発明は、人間や二足歩行ロボット等の二足歩行移動体の脚体に作用する床反力を推定する方法に関する。さらに、その床反力の推定値を用いて二足歩行移動体の脚体の関節に作用するモーメントを推定する方法に関する。

【0002】

【従来の技術】例えば人間の歩行動作を補助する歩行アシスト装置の動作制御や、二足歩行ロボットの移動動作の制御を行なう場合、人間や二足歩行ロボットの脚体に作用する床反力（詳しくは、脚体の接地部に床から作用する力）を逐次把握することが必要となる。この床反力を把握することで、二足歩行移動体の脚体の関節に作用するモーメント等を把握することが可能となり、その把握されたモーメント等に基づいて歩行アシスト装置の目標補助力や、二足歩行ロボットの各関節の目標駆動トルク等を決定することが可能となる。

【0003】前記床反力を把握する手法としては、例えば特開2000-249570号公報に開示されているものが知られている。この技術では、二足歩行移動体の定常的な歩行時に各脚体の床反力の経時変化の波形が周期的に変化することから、各脚体の床反力を、歩行周期の $1/n$ （ $n=1, 2, \dots$ ）の互いに異なる周期を有する複数の三角関数の合成値（一次結合）として把握するものである。この場合、複数の三角関数を合成する際の各三角関数の重み係数は、二足歩行移動体毎にあらかじめ定めた所定値やそれを地形に応じて調整した値が用いられている。

【0004】しかしながら、かかる技術では、二足歩行移動体の歩分もしくは複数歩分について脚体の床反力を把握しようとするものであるため、二足歩行移動体の歩容が逐次変化するような場合には、床反力を精度よく把握することは困難である。また、把握される床反力の精度を高めるためには、前記三角関数の重み係数を二足歩行移動体毎に設定したり、地形等に応じて調整したりしなければならないので、二足歩行移動体の移動環境や二足歩行移動体の個体差の影響を少なくして、床反力を精度よく把握するようにすることが困難である。

【0005】また、例えば二足歩行ロボットにおいては、各脚体の足首部や足平部に6軸力センサ等の力センサを取り付け、この力センサの出力により床反力を把握するものも知られている。さらに、床に設置したフォー

スプレート上で二足歩行移動体を歩行させ、該フォースプレートの出力により床反力を把握する手法も知られている。

【0006】しかしながら、力センサを用いる技術では、特に人間の脚体の床反力を把握しようとする場合には、人間の足首部や足平部に力センサを取り付けなければならないため、通常的な生活環境下では、該力センサが歩行の邪魔になってしまうという不都合がある。また、フォースプレートをを用いるものでは、該フォースプレートが設置された環境下でしか床反力を把握できない。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】本発明はかかる背景に鑑みてなされたものであり、比較的簡単な手法で床反力を精度よくリアルタイムで把握することができ、特に二足歩行移動体としての人間に係る床反力を把握する上で好適な床反力推定方法を提供することを目的とする。

【0008】さらに、その床反力の推定値を用いて脚体の膝関節等の関節に作用するモーメントを精度よくリアルタイムで把握することができる二足歩行移動体の関節モーメント推定方法を提供することを目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】まず、本発明の二足歩行移動体の床反力推定方法の基本的な考え方を説明する。

【0010】二足歩行移動体の脚体の運動状態、例えば歩行動作時の脚体の運動状態は、図1(a)に例示するように二足歩行移動体1の両脚体2、2のうちの一方の脚体2（図では進行方向で前側の脚体）のみが接地する単脚支持状態と、図1(b)に示すように両脚体2、2が接地する両脚支持状態とがある。

【0011】ここで、まず、前記単脚支持状態において、二足歩行移動体が運動を行う床に対して固定的な絶対座標系における該二足歩行移動体の重心の運動方程式（詳しくは重心の並進運動に関する運動方程式）は、該重心の加速度と二足歩行移動体の重量との積が、該重心に作用する重力（＝二足歩行移動体の重量×重力加速度）と、接地している脚体の接地部に床から作用する床反力との合力に等しいという関係式になる。具体的には、例えば図1(a)に示すように、床Aに対して固定した絶対座標系Cfにおいて、二足歩行移動体1の重心*40

$$\tau(F_{fx} + F_{rx}, F_{fz} + F_{rz} - M \cdot g) = M \cdot \tau(a_x, a_z) \quad \dots\dots (3)$$

尚、式(3)中の a_x 、 a_z 、 M 、 g の意味は前述のとおりである。

【0019】一方、本願発明者等の知見によれば、両脚支持状態において、各脚体2、2にそれぞれ係る床反力 F_f 、 F_r は、概ね、図1(b)に示すように、各脚体2、2の下端部近傍の特定部位12f、12r（例えば足首部）から二足歩行移動体1の重心G0に向かって作用するとみなすことができる。そして、このとき、前記重心G0に対する各脚体2、2の前記特定部位12f、12

* G0の加速度 a のX軸方向（二足歩行移動体1の進行方向での水平方向）、Z軸方向（鉛直方向）の成分をそれぞれ a_x 、 a_z 、接地している脚体2（支持脚側の脚体2）に係る床反力 F のX軸方向、Z軸方向の成分をそれぞれ F_x 、 F_z とみると、重心G0の運動方程式は、次式(1)により表される。

【0012】

$$\tau(F_x, F_z - M \cdot g) = M \cdot \tau(a_x, a_z) \quad \dots\dots (1)$$

（但し、 M ：二足歩行移動体の重量、 g ：重力加速度）

10 【0013】尚、式(1)中の両辺の括弧部分 $\tau(,)$ は2成分のベクトルを意味している。本明細書では $\tau(,)$ という形の表記は、ベクトルを表す。

【0014】従って、二足歩行移動体1の重心G0の加速度 $a = \tau(a_x, a_z)$ を把握すれば、その加速度 a と、二足歩行移動体1の重量 M の値と、重力加速度 g の値とを用いて、次式(2)により、床反力 $F = \tau(F_x, F_z)$ の推定値を得ることができることとなる。

【0015】

$$\tau(F_x, F_z) = M \cdot \tau(a_x, a_z - g) \quad \dots\dots (2)$$

20 【0016】この場合、床反力 F の推定値を得るために必要な重量 M は、あらかじめ計測等により把握することができる。また、重心G0の位置や加速度 a については、詳細は後述するが、二足歩行移動体1の各関節の屈曲角度（回転角度）を検出するセンサや、加速度センサ、ジャイロセンサ等のセンサの出力を用いて公知の手法等により逐次把握することが可能である。

30 【0017】次に、前記両脚接地状態における二足歩行移動体の重心の運動方程式（詳しくは重心の並進運動に関する運動方程式）は、該重心の加速度と二足歩行移動体の重量との積が、該重心に作用する重力（＝二足歩行移動体の重量×重力加速度）と、両脚体のそれぞれの接地部に床から作用する床反力（両脚体にそれぞれ対応する二つの床反力）との合力に等しいという関係式になる。具体的には、図1(b)に示すように二足歩行移動体1の進行方向に向かって前側の脚体2に係る床反力 F_f のXZ座標成分を F_{fx} 、 F_{fz} 、後側の脚体2に係る床反力 F_r のXZ座標成分を F_{rx} 、 F_{rz} とみると、重心G0の運動方程式は、次式(3)により表される。

【0018】

r の位置と、各脚体2、2に作用する床反力 F_f 、 F_r との間には一定の関係式、すなわち、前記重心G0と各脚体2、2の特定部位3f、3rとを結ぶ線分の向き（該重心G0に対する該特定部位3f、3rの位置ベクトルの向き）が該脚体2、2に係る床反力 F_f 、 F_r の向きに等しいという関係を表す関係式が成立する。

【0020】具体的には、図1(b)を参照して、前記絶対座標系Cfにおける重心G0の位置の座標を (X_g, Z_g) 、前側脚体2の特定部位3fの位置の座標を $(X$

f, Z f)、後側脚体2の特定部位3 rの位置の座標を * する。

(X r, Z r) とおくと、上記の関係式は次式(4)とな* 【0021】

$$(Z f - Z q) / (X f - X q) = F f z / F f x$$

$$(Z r - Z q) / (X r - X q) = F r z / F r x$$

..... (4)

【0022】そして、この式(4)と前記式(3)とか ※ 【0023】

ら次式(5)が得られる。

※

$$F f x = M \cdot \{ \Delta X f \cdot (\Delta Z r \cdot a_x - \Delta X r \cdot a_z - \Delta X r \cdot g) \} / (\Delta X f \cdot \Delta Z r - \Delta X r \cdot \Delta Z f)$$

$$F f z = M \cdot \{ \Delta Z f \cdot (\Delta Z r \cdot a_x - \Delta X r \cdot a_z - \Delta X r \cdot g) \} / (\Delta X f \cdot \Delta Z r - \Delta X r \cdot \Delta Z f)$$

$$F r x = M \cdot \{ \Delta X r \cdot (-\Delta Z f \cdot a_x + \Delta X f \cdot a_z + \Delta X f \cdot g) \} / (\Delta X f \cdot \Delta Z r - \Delta X r \cdot \Delta Z f)$$

$$F r z = M \cdot \{ \Delta Z r \cdot (-\Delta Z f \cdot a_x + \Delta X f \cdot a_z + \Delta X f \cdot g) \} / (\Delta X f \cdot \Delta Z r - \Delta X r \cdot \Delta Z f)$$

..... (5)

(但し、 $\Delta Z f = X f - X q$, $\Delta Z f = Z f - Z q$,

$\Delta X r = X r - X q$, $\Delta Z r = Z r - Z q$)

【0024】従って、二足歩行移動体1の重心G0の加速度 $a = (a_x, a_z)$ を把握すると共に、二足歩行移動体1の重心G0に対する各脚体2、2のそれぞれの特
20 定部位3 f, 3 rの位置(これは式(5)では $\Delta X f$, $\Delta Z f$, $\Delta X r$, $\Delta Z r$ により表される)を把握すれば、その加速度a及び特定部位3 f, 3 rの位置と、二足歩行移動体1の重量Mの値と、重力加速度gの値とを用いて、前記式(5)により、各脚体2毎の床反力 $F f = (F f x, F f z)$, $F r = (F r x, F r z)$ の推定値を得ることができ
ることとなる。

【0025】この場合、床反力 $F f$, $F r$ の推定値を得るために必要な重量Mは、あらかじめ計測等により把握
30 することができる。また、重心G0の加速度aや重心G0の位置、該重心G0に対する前記特定部位3 f, 3 rの位置については、詳細は後述するが、二足歩行移動体1の各関節の屈曲角度(回転角度)を検出するセンサや、加速度センサ、ジャイロセンサ等のセンサの出力を用いて、公知の手法等により逐次把握することが可能である。

【0026】以上説明したことを基礎として、本発明を次に説明する。本発明の二足歩行移動体の床反力推定方法、すなわち、二足歩行移動体の各脚体に作用する床反力を推定する方法は、前記の目的を達成するために、前
40 記二足歩行移動体の脚体の運動状態がその一方のみの脚体が接地している単脚支持状態であるか両脚体が接地している両脚支持状態であるかを判断する第1ステップと、前記二足歩行移動体の重心の位置を逐次求めつつ、該重心の位置の時系列データを用いて床に対して固定された絶対座標系での該重心の加速度を逐次求める第2ステップと、少なくとも前記両脚支持状態において各脚体の下端部近傍にあらかじめ定めた特定部位の前記重心に対する位置を逐次求める第3ステップとを備える。そして、本発明の床反力推定方法は、前記二足歩行移動体の

単脚支持状態であるときには、二足歩行移動体の重量と重力加速度と前記重心の加速度と接地している脚体に作用する前記床反力とにより表される該重心の運動方程式に基づき、接地している脚体に作用する前記床反力の推定値を逐次求め、前記二足歩行移動体の両脚支持状態であるときには、二足歩行移動体の重量と重力加速度と前記重心の加速度と両脚体のそれぞれに作用する前記床反力とにより表される該重心の運動方程式と、各脚体に作用する前記床反力が該脚体の前記特定部位から前記重心に向かって作用すると仮定して定まる、各脚体の特定部位の前記重心に対する位置と該脚体に作用する前記床反力との間の関係式とに基づき両脚体のそれぞれに作用する前記床反力の推定値を逐次求めることを特徴とするものである。

【0027】かかる本発明によれば、前記第1ステップにおいて、二足歩行移動体の脚体の運動状態が単脚支持状態であるか両脚支持状態であるかが判断され、それぞれの支持状態に応じた手法により前記床反力の推定値が求められる。すなわち、二足歩行移動体の単脚支持状態では、二足歩行移動体の重心の前述の運動方程式(式(1)参照)に基づいて、二足歩行移動体の重量、重力
40 加速度及び重心の加速度の値から、接地している脚体に作用する前記床反力の推定値が求められる(式(2)参照)。

【0028】また、二足歩行移動体の両脚支持状態では、二足歩行移動体の重心の前述の運動方程式(式(3)参照)と、各脚体の特定部位の前記重心に対する位置と該脚体に作用する前記床反力との間の関係式(式(4))とに基づいて、二足歩行移動体の重量、重力加速度及び重心の加速度、並びに、重心に対する各脚体の特定部位の位置から、両脚体のそれぞれに作用する床反力の推定値が求められる(式(5)参照)。尚、単脚支

持状態では、遊脚側の脚体（接地していない脚体）に作用する床反力は「0」である。

【0029】この場合、床反力の推定値を求めるために必要な二足歩行移動体の重量は、あらかじめ計測等により把握しておけばよい。また、二足歩行移動体の重心の位置や加速度、該重心に対する各脚体の特定部位の位置は、二足歩行移動体の各関節の屈曲角度（回転角度）を検出するセンサ（ポテンシオメータ等）や、加速度センサ、ジャイロセンサ等、比較的小型で二足歩行移動体への装備が容易なセンサの出力のデータを用いてリアルタイムで把握することが可能である。

【0030】従って、本発明の床反力推定方法によれば、二足歩行移動体の足首部や足平部に力センサを装着したり、フォースプレートを使用したりすることなく、比較的に簡単な手法で床反力をリアルタイムで把握することができる。

【0031】かかる本発明の床反力推定方法では、前記各脚体の特定部位は、該脚体の足首部であることが好適である。このようにすることにより、特に、両脚接地状態における前述の仮定の信頼性が高まる。このため、前記単脚支持状態における床反力の推定値はもちろん、両脚支持状態における床反力の推定値の精度を高めることができる。つまり、脚体の運動状態によらずに、精度よく床反力を推定することができる。

【0032】また、本発明の床反力推定方法では、前記両脚体上に各脚体の股関節を介して支持された胴体の股関節寄りの下部の上下方向の加速度を計測するステップを備え、前記第1ステップでは、前記胴体の下部の上下方向の加速度があらかじめ定めた所定の閾値以上に上昇した時に前記両脚支持状態が開始すると共に前記単脚支持状態が終了し、且つ、前記両脚支持状態で先行して離床する側の脚体に作用する前記床反力の推定値があらかじめ定めた所定の閾値以下に低下した時に前記両脚支持状態が終了すると共に前記単脚支持状態が開始するとし、前記二足歩行移動体の運動状態を判断する。

【0033】すなわち、二足歩行移動体の移動時（歩行時）に、脚体の運動状態が単脚支持状態から両脚支持状態に移行する際に、遊脚側の脚体が接地することで、胴体の下部の上下方向の加速度（上向きの加速度）が一時的に顕著に大きなものとなる。そして、この現象は、脚体の他の運動状態では一般には生じない。また、脚体の運動状態が両脚支持状態から単脚支持状態に移行する際には、一方の脚体の離床動作が行なわれることで、その脚体に作用する床反力は、「0」に低下していく。従って、上記のように脚体の運動状態を判断することで、単脚支持状態であるか両脚支持状態であるかの判断を適正に行うことができる。この結果、単脚支持状態と両脚支持状態とで異なるものとなる床反力の推定値の算出手法を的確なタイミングで切替えることができ、ひいては、該床反力の推定値の精度を高めることができる。また、

脚体の運動状態の判断のために必要な胴体の下部の上下方向の加速度は、例えば該胴体の下部に加速度センサを取り付けておくことで、該加速度センサの出力により容易に把握することができる。

【0034】尚、人間のように、前記胴体が両脚体に股関節を介して連結された腰部と、該腰部上に該腰部に対して傾斜可能に存する胸部とを有するよう場合には、計測する胴体の下部の上下方向の加速度は、前記腰部の上下方向の加速度であることが好適である。

【0035】また、本発明の床反力推定方法では、前記第2ステップで二足歩行移動体の重心の位置や該重心の加速度を把握する手法としては、種々の手法が考えられ、また、種々の公知の手法を用いることが可能であるが、次のような手法により、該重心の位置や該重心の加速度を把握することが好適である。

【0036】すなわち、前記両脚体上に各脚体の股関節を介して支持された胴体の傾斜角度と、各脚体の少なくとも股関節及び膝関節のそれぞれの屈曲角度と、前記二足歩行移動体のあらかじめ定めた基準点の前記絶対座標系における加速度とをそれぞれ計測するステップを備え、前記第2ステップでは、前記胴体の傾斜角度と、前記股関節及び膝関節のそれぞれの屈曲角度と、前記二足歩行移動体を複数の剛体の連結体として表してなる剛体リンクモデルと、該剛体リンクモデルの各剛体に対応する二足歩行移動体の各剛体相当部のあらかじめ求めた重量と、各剛体相当部における該剛体相当部のあらかじめ求めた重心の位置とに基づき、前記基準点に対する前記二足歩行移動体の重心の位置を逐次求めると共に、その重心の位置の時系列データに基づき該基準点に対する該重心の加速度を逐次求め、その基準点に対する該重心の加速度と、前記絶対座標系における該基準点の加速度とから該絶対座標系での前記重心の加速度を求める。

【0037】すなわち、二足歩行移動体に任意に基準点を定めたとき、該基準点に対する二足歩行移動体の重心の位置は、概ね、胴体と、各脚体の股関節から膝関節にかけての大腿部と、膝関節から下側の下腿部との相互の姿勢関係により定まる。そして、その姿勢関係は、胴体の傾斜角度と、股関節及び膝関節のそれぞれの屈曲角度とを計測することで、それらの計測データから把握することが可能である。さらに、詳細は後述するが、二足歩行移動体に対して前記剛体リンクモデル（例えば二足歩行移動体の両脚体の股関節の上側の部分（胴体を含む）、各脚体の大腿部、下腿部を剛体とみなすモデル）を想定したとき、二足歩行移動体の各剛体相当部の重量と、各剛体相当部における該剛体相当部の重心の位置（詳しくは、各剛体相当部に対して固定した座標系における該剛体相当部の位置）と、上記の姿勢関係とに基づいて前記基準点に対する二足歩行移動体の重心の位置を求めることができる。さらに、基準点に対する該重心の加速度は、該重心の位置の時系列データから把握される

該重心の位置の2階微分値として求められる。従って、前記絶対座標系における前記基準点の加速度を計測しておくことにより、該絶対座標系における二足歩行移動体の重心の加速度は、該基準点に対する該重心の加速度と、該基準点の加速度との合成加速度として求められることとなる。

【0038】この場合、上述のように二足歩行移動体の加速度を把握するために必要な胴体の傾斜角度は、該胴体に取り付けた加速度センサとジャイロセンサ、又は傾斜計等のセンサの出力から把握することが可能であり、各脚体の股関節及び膝関節の屈曲角度はそれぞれの関節の箇所に取り付けたポテンショメータ等のセンサの出力により把握することが可能である。また、前記絶対座標系における前記基準点の加速度は、該基準点と一体的な部分に取り付けた加速度センサ等のセンサの出力により把握することが可能である。さらに、二足歩行移動体の各剛体相当部の重量や、各剛体相当部における該剛体相当部の重心の位置は、あらかじめ計測等により把握することが可能である。

【0039】従って、二足歩行移動体に比較的大型なセンサ等を装備したりすることなく、二足歩行移動体の重心の位置や加速度をリアルタイムで容易に把握することが可能となる。

【0040】このように二足歩行移動体の重心の位置や加速度を求める場合、前記基準点は、前記胴体に設定されていることが好適である。これによれば、前記絶対座標系における該基準点の加速度を計測するための加速度センサ等のセンサを胴体に装備することができるため、脚体に装備するセンサを少なくでき、該センサが二足歩行移動体の歩行動作の邪魔になるような事態を回避できる。

【0041】また、人間のように、前記両脚体に股関節を介して連結された腰部と、該腰部上に該腰部に対して傾斜可能に存する胸部とを有し、前記重心の位置を求めるために用いる前記胴体の傾斜角度は、前記腰部及び胸部のそれぞれの傾斜角度であることが好適である。そして、特にこの場合、前記剛体リンクモデルは、前記二足歩行移動体の各脚体の膝関節の下側に存する下腿部と、該膝関節及び前記股関節の間の大腿部と、前記腰部と、該腰部の上側に存する前記胸部を含む上体部とをそれぞれ剛体として表したモデルであることが好適である。

【0042】これによれば、特に二足歩行移動体が人間である場合に、その重心の位置や加速度を精度よく把握することができ、ひいては、床反力の推定値の精度を高めることができる。

【0043】尚、上述のように胴体の傾斜角度等から前記基準点に対する二足歩行移動体の重心の位置を求める場合には、前記第3ステップでは、該基準点に対する各脚体の前記特定部位の位置を求めることで、二足歩行移動体の重心に対する前記特定部位の位置を求めることが

できる。この場合、基準点に対する前記特定部位の位置を求めるために必要なパラメータは、前記基準点の設定位置によって異なる。例えば、前記特定部位が各脚体の足首部であり、また、前記基準点を胴体に設定した場合には、該胴体の傾斜角度（胴体が前記腰部及び胸部を有する場合で、基準点が腰部に設定されている場合には、該腰部の傾斜角度）と、各脚体の股関節及び膝関節の屈曲角度と、各脚体の大腿部及び下腿部のサイズ（長さ）とに基づいて、基準点に対する各脚体の特定部位の位置を求めることが可能である。

【0044】次に、本発明の二足歩行移動体の関節モーメント推定方法は、前述した本発明の床反力推定方法により逐次求めた前記各脚体に係る床反力の推定値を用いて前記二足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用するモーメントを推定する方法である。そして、本発明の関節モーメント推定方法は、前記両脚体上に各脚体の股関節を介して支持された胴体の傾斜角度と前記各脚体の少なくとも股関節及び膝関節のそれぞれの屈曲角度と記二足歩行移動体のあらかじめ定めた基準点の前記絶対座標系における加速度とをそれぞれ計測するステップと、前記胴体の傾斜角度と前記各脚体の股関節及び膝関節のそれぞれの屈曲角度と前記二足歩行移動体を複数の剛体の連結体として表してなる剛体リンクモデルとに基づき、該剛体リンクモデルの各剛体に対応する二足歩行移動体の各剛体相当部の傾斜角度を逐次求めるステップと、前記各剛体相当部の傾斜角度と各剛体相当部のあらかじめ求めた重量と各剛体相当部における該剛体相当部のあらかじめ求めた重心の位置とに基づき、前記基準点に対する各剛体相当部の重心の位置を逐次求めると共に、その各剛体相当部の重心の位置の時系列データに基づき該基準点に対する各剛体相当部の重心の加速度を逐次求めるステップと、該基準点に対する各剛体相当部の重心の加速度と前記絶対座標系における前記基準点の加速度とから該絶対座標系における各剛体相当部の重心の加速度を逐次求めるステップと、前記各剛体相当部の傾斜角度の時系列データに基づき各剛体相当部の角加速度を逐次求めるステップと、前記二足歩行移動体の剛体相当部としての各脚体の大腿部の傾斜角度と、該脚体の膝関節の屈曲角度とのうちの少なくとも一方に基づき該二足歩行移動体における各脚体の床反力作用点の推定位置を逐次求めるステップとを備え、前記床反力の推定値と、前記床反力作用点の推定位置と、前記絶対座標系における各剛体相当部の重心の加速度及び該剛体相当部の角加速度と、各剛体相当部の傾斜角度と、各剛体相当部のあらかじめ求めた重量及びサイズと、各剛体相当部における該剛体相当部のあらかじめ求めた重心の位置と、各剛体相当部のあらかじめ求めた慣性モーメントとを用いて逆力学モデルに基づき前記二足歩行移動体の各脚体の少なくとも一つの関節に作用するモーメントを推定することを特徴とするものである。

【0045】尚、前述のように、前記床反力推定方法における前記第2ステップで基準点に対する二足歩行移動体の重心の位置等を求めるために、胴体の傾斜角度と、各脚体の股関節及び膝関節のそれぞれの屈曲角度と二足歩行移動体の基準点の前記絶対座標系における加速度とをそれぞれ計測するステップを備えたときには、それらを改めて計測する必要はなく、また、前記剛体リンクモデルは、二足歩行移動体の重心の位置等を求めるために用いた剛体リンクモデルと同一の剛体リンクモデルを使用すればよい。

【0046】かかる本発明の関節モーメント推定方法では、胴体の傾斜角度と、股関節及び膝関節のそれぞれの屈曲角度とを計測することで、それらの計測データから胴体、大腿部、下腿部等の二足歩行移動体の各剛体相当部の傾斜角度（これは各剛体相当部の相互の姿勢関係を表す）を把握することが可能である。そして、各剛体相当部の重量と、各剛体相当部における該剛体相当部の重心の位置（詳しくは、各剛体相当部に対して固定した座標系における該剛体相当部の位置）と、上記の各剛体相当部の傾斜角度とに基づいて前記基準点に対する各剛体相当部の重心の位置を求めることができる。さらに、基準点に対する各剛体相当部の重心の加速度は、該重心の位置の時系列データから把握される該重心の位置の2階微分値として求められる。従って、前記絶対座標系における前記基準点の加速度を計測しておくことにより、該絶対座標系における二足歩行移動体の各剛体相当部の重心の加速度が、該重心の基準点に対する加速度と、前記基準点の加速度（絶対座標系での加速度）との合成加速度として求められることとなる。

【0047】さらに、前記各剛体相当部の傾斜角度の時系列データから把握される該傾斜角度の2階微分値として、各剛体相当部の角加速度が求められる。

【0048】また、本願発明者等の知見によれば、二足歩行移動体における各脚体の床反力作用点の位置、例えば、各脚体の足首部に対する該脚体の床反力作用点の位置は、前記二足歩行移動体の剛体相当部としての各脚体の大腿部の傾斜角度や、該脚体の膝関節の屈曲角度と密接な相関関係を有する。従って、該脚体の大腿部の傾斜角度と、膝関節の屈曲角度とのうちの少なくとも一方に基づいて、二足歩行移動体における床反力作用点の推定位置を求めることができる。

【0049】そして、上述のように二足歩行移動体の各剛体相当部の重心の加速度、該剛体相当部の角加速度、床反力作用点の推定位置を求めたとき、前記床反力推定方法により求められる床反力の推定値と併せて、それらのデータ等から、公知の所謂逆動力学モデルに基づいて各脚体の膝関節や股関節に作用するモーメントを推定することができる。この逆動力学モデルに基づく手法は、それを簡略的に言えば、二足歩行移動体の各剛体相当部の重心の並進運動に関する運動方程式と、該剛体相当部

の回転運動（例えば該剛体相当部の重心の回りの回転運動）に関する運動方程式とを用いて剛体リンクモデルの各関節に相当する二足歩行移動体の各関節に作用するモーメントを床反力作用点により近いものから順番に求めていくものである。詳細は後述するが、例えば各脚体が大腿部及び下腿部をそれぞれ剛体相当部として有する連結体であるとした場合、各脚体の下腿部の重心の並進運動に関する運動方程式に、該下腿部の重心の加速度、該脚体に作用する床反力の推定値、下腿部の重量の値を適用することで、該脚体の膝関節に作用する力（関節反力）が判る。さらに、該脚体の膝関節に作用する関節反力と、該脚体の下腿部の角加速度と、該脚体の床反力作用点の推定位置と、該脚体の床反力の推定値と、該下腿部における該下腿部の重心の位置及び該下腿部のサイズ（長さ）に係わるデータ値と、該下腿部の慣性モーメントの値と、該下腿部の傾斜角度の値とを該下腿部の回転運動に関する運動方程式に適用することで、該脚体の膝関節のモーメントを推定することができる。

【0050】また、各脚体の大腿部の重心の並進運動に関する運動方程式に、該大腿部の重心の加速度、該脚体の膝関節に作用する関節反力、大腿部の重量の値とを適用することで、該脚体の股関節に作用する関節反力が判る。さらに、該脚体の膝関節及び股関節にそれぞれ作用する関節反力と、該脚体の大腿部の角加速度と、該大腿部における該大腿部の重心の位置及び該大腿部のサイズ（長さ）に係わるデータ値と、該大腿部の慣性モーメントの値と、該大腿部の傾斜角度の値とを該大腿部の回転運動に関する運動方程式に適用することで、該脚体の股関節のモーメントを推定することができる。

【0051】かかる本発明の関節モーメント推定方法によれば、前述の本発明の床反力推定方法により求められた床反力の推定値を用いて脚体の関節に作用するモーメントを推定することにより、二足歩行移動体に比較的大きなセンサ等を装備したりすることなく、脚体の関節に作用するモーメントを比較的精度よくリアルタイムで推定することができる。

【0052】

【発明の実施の形態】本発明の一実施形態を前記図1並びに図2～図10を参照して説明する。

【0053】本実施形態は、二足歩行移動体としての人間に本発明の床反力推定方法及び関節モーメント推定方法を適用した実施形態である。

【0054】図2に模式化して示すように、人間1は、その構成を大別すると、左右一対の脚体2、2と、腰部3及び胸部4からなる胴体5と、頭部6と、左右一対の腕体7、7とを有する。胴体5は、その腰部3が脚体2、2のそれぞれに左右一対の股関節8、8を介して連結され、両脚体2、2上に支持されている。また、胴体5の胸部4は、腰部3の上側に該腰部3に対して人間1の前方側に傾斜可能に存している。そして、この胸部4

の上部の左右両側部から腕体7、7が延設され、該胸部4の上端部に頭部6が支持されている。

【0055】各脚体2、2は、股関節8から延在する大腿部9と、該大腿部9の先端から膝関節10を介して延在する下腿部11とを有し、下腿部11の先端部に、足首部(足首関節)12を介して足平部13が連結されている。

【0056】本実施形態では、このような構成を有する人間1の各脚体2に作用する床反力の推定、さらには膝関節10及び股関節8に作用するモーメントの推定を行うために、次のような装置を人間1に装備している。

【0057】すなわち、胴体5の胸部4には、胸部4の傾斜に伴う角速度に応じた出力を発生するジャイロセンサ14(以下、胸部ジャイロセンサ14という)と、胸部4の前後方向の加速度に応じた出力を発生する加速度センサ15(以下、胸部前後加速度センサ15という)と、CPU、RAM、ROM等から構成される演算処理装置16と、該演算処理装置16等の電源となるバッテリー17とが装着されている。この場合、これらの胸部ジャイロセンサ14、胸部前後加速度センサ15、演算処理装置16及びバッテリー17は、例えば胸部4に図示しないベルト等を介して固定されるショルダーバッグ状の収容部材18に収容され、該収容部材18を介して胸部4に一体的に固定されている。

【0058】尚、胸部加速度センサ15の出力が表す加速度は、より詳しくは、胸部4の水平断面方向(胸部4の軸心と直交する方向)での前後方向の加速度であり、人間1が平地に直立姿勢で起立した状態では、前後水平方向(図2の絶対座標系のX軸方向)での加速度であるが、腰部3あるいは胸部4が鉛直方向(図2の絶対座標系のZ軸方向)から傾斜した状態では、胸部4の鉛直方向に対する傾斜角度分だけ水平方向に対して傾斜した方向での加速度となる。

【0059】また、胴体5の腰部3には、腰部3の傾斜に伴う角速度に応じた出力を発生するジャイロセンサ19(以下、腰部ジャイロセンサ19という)と、腰部3の前後方向の加速度に応じた出力を発生する加速度センサ20(以下、腰部前後加速度センサ20という)と、腰部3の上下方向の加速度に応じた出力を発生する加速度センサ21(以下、腰部上下加速度センサ21という)とが、図示しないベルト等の固定手段を介して一体的に装着・固定されている。

【0060】ここで、腰部前後加速度センサ20は、より詳しくは胸部前後加速度センサ15と同様、腰部3の水平断面方向(腰部3の軸心と直交する方向)での前後方向の加速度を検出するセンサである。また、腰部上下加速度センサ21は、より詳しくは、腰部3の軸心方向での上下方向の加速度(これは腰部前後加速度センサ20が検出する加速度と直交する)を検出するセンサである。尚、腰部前後加速度センサ20及び腰部上下加速度

センサ21は、二軸型の加速度センサにより一体的に構成されたものであってもよい。

【0061】さらに各脚体2の股関節8と膝関節10とには、それぞれの屈曲角度 $\Delta\theta_c$ 、 $\Delta\theta_d$ に応じた出力を発生する股関節角度センサ22及び膝関節角度センサ23が装着されている。尚、股関節角度センサ22については、図2では手前側(人間1の前方に向かって右側)の脚体2の股関節8に係わる股関節角度センサ22のみが図示されているが、他方側(人間1の前方に向かって左側)の脚体2の股関節8には、手前側の股関節角度センサ22と同心に、股関節角度センサ22が装着されている。

【0062】これらの角度センサ22、23は、例えばポテンシオメータにより構成されたものであり、各脚体2に図示しないバンド部材等の手段を介して装着されている。ここで、各股関節角度センサ22が検出する屈曲角度 $\Delta\theta_c$ は、より詳しくは、腰部3と各脚体2の大腿部9との姿勢関係が所定の姿勢関係(例えば人間1の直立姿勢状態のように腰部3の軸心と大腿部9の軸心とがほぼ平行となる姿勢関係)にあるときを基準とした、腰部3に対する各脚体2の大腿部9の股関節8回り(人間1の左右方向における股関節8の軸心回り)の回転角度である。同様に、各膝関節角度センサ23が検出する屈曲角度 $\Delta\theta_d$ は、各脚体2の大腿部9と下腿部11との姿勢関係が所定の姿勢関係(例えば大腿部9の軸心と下腿部11の軸心とがほぼ平行となる姿勢関係)にあるときを基準とした、大腿部9に対する下腿部11の膝関節10回り(人間1の左右方向における膝関節10の軸心回り)の回転角度である。

【0063】尚、前記各センサ14、15、19~23は、それらの出力を演算処理装置16に入力すべく、図示を省略する信号線を介して演算処理装置16に接続されている。

【0064】前記演算処理装置16は、図3に示すような機能的手段を備えている。すなわち、演算処理装置16は、腰部上下加速度センサ21の検出データと、後述する床反力推定手段36により求められた各脚体2の床反力の推定値のデータとを用いて、人間1の脚体2、2の運動状態が単脚支持状態(図1(a)の状態)であるか、両脚支持状態(図1(b)の状態)であるかを判断する脚体運動判断手段24を備えている。また、演算処理装置16は、胸部前後加速度センサ15及び胸部ジャイロセンサ14の検出データを用いて、胸部4の絶対座標系Cfにおける傾斜角度 θ_a (具体的には例えば鉛直方向に対する傾斜角度 θ_a 、図2参照)を計測する胸部傾斜角度計測手段25と、腰部前後加速度センサ20及び腰部ジャイロセンサ19の検出データを用いて、腰部3の絶対座標系Cfにおける傾斜角度 θ_b (具体的には例えば鉛直方向に対する傾斜角度 θ_b 、図2参照)を計測する腰部傾斜角度計測手段26とを備えている。

【0065】さらに、演算処理装置16は、腰部前後加速度センサ20及び腰部上下加速度センサ21の検出データと前記腰部傾斜角度計測手段26により計測された腰部3の傾斜角度 θ_b のデータとを用いて、本実施形態における人間1の基準点として図2に示すように腰部3に設定される身体座標系Cp(図2のxz座標)の原点Oの絶対座標系Cfにおける加速度(並進加速度) $a_o = {}^T(a_o x, a_o z)$ を求める基準加速度計測手段27を備えている。ここで、身体座標系Cpは、より詳しくは、例えば人間1の左右の股関節8、8のそれぞれの中心を結ぶ線の中点を原点Oとし、鉛直方向をz軸方向、人間1の前方向に向かう水平方向をx軸方向とした座標系(3軸の方向が前記絶対座標系Cfと同一の座標系)である。

【0066】また、演算処理装置16は、各脚体2の股関節角度センサ22及び膝関節角度センサ23の検出データと、前記腰部傾斜角度計測手段26による腰部3の傾斜角度 θ_b のデータとを用いて、絶対座標系Cfにおける各脚体2の大腿部9及び下腿部11のそれぞれの傾斜角度 θ_c 、 θ_d (具体的には例えば鉛直方向に対する傾斜角度 θ_c 、 θ_d 、図2参照)を求める脚体姿勢算出手段28を備えている。

【0067】また、演算処理装置16は、前記胸部傾斜角度計測手段25、腰部傾斜角度計測手段26及び脚体姿勢算出手段28により得られる胸部4の傾斜角度 θ_a 、腰部3の傾斜角度 θ_b 、並びに各脚体2の大腿部9の傾斜角度 θ_c 及び下腿部11の傾斜角度 θ_d のデータを用いて、後述の剛体リンクモデルに対応する人間1の各剛体相当部の重心の位置(詳しくは前記身体座標系Cpにおける各剛体相当部の重心の位置)を求める各部重心位置算出手段29と、その各剛体相当部の重心の位置のデータを用いて、上記身体座標系Cpにおける人間1の全体の重心の位置を求める身体重心位置算出手段30と、その人間1の全体の重心G0(図1参照。以下、身体重心G0という)の位置のデータと前記脚体姿勢算出手段28による各脚体2の大腿部9及び下腿部11のそれぞれの傾斜角度 θ_c 、 θ_d のデータとを用いて本実施形態における各脚体2の特定部位としての各脚体2の足首部12の身体重心G0に対する位置(詳しくは、前記式(5)における ΔX_f 、 ΔZ_f 、 ΔX_r 、 ΔZ_r)を求める足首位置算出手段31と、前記身体重心位置算出手段30による身体重心の位置のデータと前記基準加速度計測手段27による身体座標系Cpの原点Oの加速度 a_o のデータとを用いて絶対座標系Cfにおける身体重心G0の加速度 $a = {}^T(a_x, a_z)$ (図1参照)を求める身体重心加速度算出手段32とを備えている。

【0068】さらに、演算処理装置16は、前記各部重心位置算出手段29による人間1の各剛体相当部の重心の位置(詳しくは脚体2に係わる剛体相当部の重心の位置)のデータと前記基準加速度計測手段27による身体座標系Cpの原点Oの加速度 a_o のデータとを用いて絶対

座標系Cfにおける各脚体2の大腿部9及び下腿部11のそれぞれの重心の加速度(並進加速度)を求める脚体各部加速度算出手段33と、前記脚体姿勢算出手段28による各脚体2の大腿部9及び下腿部11のそれぞれの傾斜角度 θ_c 、 θ_d のデータを用いて絶対座標系Cfにおける各脚体2、2の大腿部9及び下腿部11の角加速度を求める脚体各部角加速度算出手段34と、前記脚体姿勢算出手段28により求められる大腿部9の傾斜角度 θ_c や、前記膝関節角度センサ23により計測される膝関節10の屈曲角度 $\Delta \theta_d$ のデータを用いて接地している各脚体2の床反力作用点の位置を推定する床反力作用点推定手段35とを備えている。

【0069】また、演算処理装置16は、前記身体重心加速度算出手段32による身体重心の加速度 a のデータと前記足首位置算出手段31による各脚体2の足首部12の身体重心に対する位置のデータと前記脚体運動判断手段24による脚体2の運動状態の判断結果のデータとを用いて各脚体2に作用する床反力の推定値を求める床反力推定手段36と、この床反力の推定値のデータと脚体各部加速度算出手段33による各脚体2の大腿部9及び下腿部11の重心の加速度のデータと脚体各部角加速度算出手段34による各脚体2の大腿部9及び下腿部11の角加速度のデータと床反力作用点推定手段35による床反力作用点の推定位置のデータと前記脚体姿勢算出手段28による各脚体2の大腿部9及び下腿部11のそれぞれの傾斜角度 θ_c 、 θ_d のデータとを用いて各脚体2の膝関節10及び股関節8にそれぞれ作用するモーメントを推定する関節モーメント推定手段37とを備えている。

【0070】次に、上述の演算処理装置16の各手段のより詳細な処理内容と併せて、本実施形態の作動を説明する。

【0071】本実施形態では、例えば人間1が歩行等の脚体2の運動を行うに際して、両脚体2、2を着床させた状態で演算処理装置16の図示しない電源スイッチを投入すると、該演算処理装置16による処理が所定のサイクルタイム毎に以下に説明するように逐次実行され、各脚体2に作用する床反力の推定値等が逐次求められる。

【0072】すなわち、まず、演算処理装置16は、前記脚体運動判断手段24の処理を実行する。この脚体運動判断手段24の処理では、前記サイクルタイム毎に、前記腰部上下加速度センサ21による腰部3の上向き方向の加速度の検出データがあらかじめ定めた所定の閾値と比較される。そして、該加速度の検出値がその閾値を超えたときに、前記図1(b)に示したような両脚支持状態が開始し、且つ、前記図1(a)に示したような単脚支持状態が終了すると判断される。すなわち、人間1の歩行時に、単脚支持状態から両脚支持状態への移行の際には、遊脚側の脚体2が着床することで、股関節8の

近傍の腰部3には、ほぼ上向きに比較的大きな加速度（通常の単脚支持状態では発生し得ない加速度）が発生する。このため、前記脚体運動判断手段24は、上記のように腰部上下加速度センサ21による腰部3の上向き方向の加速度の検出データを所定の閾値と比較することで、両脚支持状態の開始及び単脚支持状態の終了を判断する。

【0073】また、脚体運動判断手段24の処理では、両脚支持状態で床反力推定手段35により後述するように求められた両脚体2、2のそれぞれに作用する床反力 F_f , F_r (図1(b)参照)の推定値のうち、人間の進行方向に対して後側の脚体2に係る床反力 $F_r = \sqrt{(F_{rx}^2 + F_{rz}^2)}$ の推定値（詳しくは演算処理装置16の前のサイクルタイムで求められた床反力 F_r の絶対値 $= \sqrt{(F_{rx}^2 + F_{rz}^2)}$ ）があらかじめ定めた所定の閾値（略「0」の正の値）と比較される。そして、該床反力 F_r の推定値の絶対値がその閾値以下に低下したときに、両脚支持状態が終了し、且つ単脚支持状態が開始すると判断される。尚、本実施形態では、脚体2の運動状態の初期状態は、両脚支持状態であり、いずれか一方の脚体2に係る床反力の推定値が上記閾値以下に低下するまでは、脚体運動判断手段24は、脚体2の運動状態が両脚支持状態であると判断する。

【0074】上述のような脚体運動判断手段24の処理と並行して、演算処理装置16は、前記胸部傾斜角度計測手段25及び腰部傾斜角度計測手段26による処理を実行する。この場合、胸部傾斜角度計測手段25の処理では、胸部前後加速度センサ15及び胸部ジャイロセンサ14からそれぞれ入力される胸部4の前後方向の加速度、胸部4の角速度の検出データから、所謂カルマンフィルタの処理を用いた公知の手法により、絶対座標系Cfにおける胸部4の傾斜角度 θ_a が前記サイクルタイム毎に逐次求められる。同様に、腰部傾斜角度計測手段25の処理では、腰部前後加速度センサ20及び腰部ジャイロセンサ19からそれぞれ入力される腰部3の前後方向の加速度、腰部3の角速度の検出データから、カルマンフィルタの処理を用いて絶対座標系Cfにおける腰部3の傾斜角度 θ_b が逐次求められる。ここで、絶対座標系Cfにおける胸部4及び腰部3のそれぞれの傾斜角度 θ_a , θ_b は、本実施形態では例えば鉛直方向（重力方向）に対する傾斜角度である。

【0075】尚、例えばジャイロセンサ14, 19による角速度の検出データを積分することで、胸部4や腰部3の傾斜角度を求めることも可能であるが、本実施形態のようにカルマンフィルタの処理を用いることで、胸部*

$$a_0 = {}^T(a_0x, a_0z)$$

$$= {}^T(ap \cdot \cos \theta_b - aq \cdot \sin \theta_b, ap \cdot \sin \theta_b + aq \cdot \cos \theta_b - g)$$

$$\dots\dots (8)$$

【0085】次に、演算処理装置16は、前記各部重心位置算出手段29の処理を実行し、以下に説明する剛体

*4や腰部3の傾斜角度 θ_a , θ_b を精度よく計測することができる。

【0076】次に、演算処理装置16は、前記脚体姿勢算出手段28の処理と前記基準加速度計測手段27の処理とを実行する。

【0077】前記脚体姿勢算出手段28による処理では、絶対座標系Cfにおける各脚体2の大腿部9及び下腿部11の傾斜角度 θ_c , θ_d (鉛直方向に対する傾斜角度。図2参照)が前記サイクルタイム毎に次のように求められる。すなわち、各脚体2の大腿部9の傾斜角度 θ_c は、その脚体2に装着されている前記股関節角度センサ22による股関節8の屈曲角度 $\Delta \theta_c$ の検出データの今回値と、前記腰部傾斜角度計測手段25により求められた腰部3の傾斜角度 θ_b の今回値とから次式(6)により算出される。

$$\theta_c = \theta_b + \Delta \theta_c \quad \dots\dots (6)$$

【0079】ここで、腰部3の傾斜角度 θ_b は、該腰部3の上端部が下端部よりも人間1の前方側に突き出るように該腰部3が鉛直方向に対して傾斜している場合に負の値となるものであり、股関節8の屈曲角度 $\Delta \theta_c$ は、大腿部9の下端部が人間1の前方側に突き出るように大腿部9が腰部3の軸心に対して傾斜している場合に正の値となるものである。

【0080】さらに、各脚体2の下腿部11の傾斜角度 θ_d は、上記のように求められた大腿部9の傾斜角度 θ_c の今回値と、該脚体2に装着されている前記膝関節角度センサ23による膝関節10の屈曲角度 $\Delta \theta_d$ の検出データの今回値とから次式(7)により算出される。

$$\theta_d = \theta_c - \Delta \theta_d \quad \dots\dots (7)$$

【0082】ここで、膝関節10の屈曲角度は、下腿部11が大腿部9の軸心に対して該大腿部9の背面側に傾斜している場合に正の値となるものである。

【0083】また、前記基準加速度計測手段27の処理では、前記身体座標系Cpの原点Oの絶対座標系Cfにおける加速度 $a_0 = {}^T(a_0x, a_0z)$ が次のように求められる。すなわち、前記腰部前後加速度センサ20による腰部3の前後方向の加速度の検出データの今回値を ap 、前記腰部上下加速度センサ21による腰部3の上下方向の加速度の検出データの今回値を aq とすると、それらの検出データ ap , aq と、前記腰部傾斜角度計測手段25により求められた腰部3の傾斜角度 θ_b の今回値とから、次式(8)により絶対座標系Cfにおける加速度 $a_0 = {}^T(a_0x, a_0z)$ が求められる。

$$\text{【0084】}$$

リンクモデルを用いて、前記身体座標系Cpにおける人間1の各剛体相当部の重心の位置（身体座標系Cpの原

点に対する位置)を求める。

【0086】図4に示すように、本実施形態で用いる剛体リンクモデルRは、人間1を、各脚体2の大腿部9に相当する剛体R1、R1と、下腿部11に相当する剛体R2、R2と、腰部3に相当する剛体R3と、前記胸部4、腕体7、7及び頭部6を合わせた部分38(以下、上部部38という)に相当する剛体R4とを連結してなるものとして表現するモデルである。この場合、各剛体R1と剛体R3との連結部、並びに、各剛体R1と剛体R2との連結部がそれぞれ股関節8、膝関節10に相当する。また、剛体R3と剛体R4との連結部は腰部3に対する胸部4の傾動支点部39である。

【0087】そして、本実施形態では、このような剛体リンクモデルRの各剛体R1~R4に対応する人間1の剛体相当部(各脚体2の大腿部9及び下腿部11、腰部3、上部部38)のそれぞれの重心G1、G2、G3、G4の各剛体相当部における位置があらかじめ求められ、演算処理装置16の図示しないメモリに記憶されている。

【0088】ここで、演算処理装置16に記憶保持している各剛体相当部の重心G1、G2、G3、G4の位置は、各剛体相当部に対して固定した座標系での位置である。この場合、各剛体相当部の重心G1、G2、G3、G4の位置を表すデータとして、例えば、各剛体相当部の一端部の関節の中心点から該剛体相当部の軸心方向の距離が用いられる。具体的には、例えば図4に示すように、各大腿部9の重心G1の位置は、該大腿部9の股関節8の中心から大腿部9の軸心方向に距離 t_1 の位置、各下腿部11の重心G2の位置は、該下腿部11の膝関節10の中心から下腿部11の軸心方向に距離 t_2 の位置として表され、それらの距離 t_1 、 t_2 の値があらかじめ求められて演算処理装置16に記憶保持されている。他の剛体相当部の重心、G3、G4の位置についても同様である。

【0089】尚、上部部38の重心G4の位置は、厳密には、該上部部38に含まれる腕体7、7の動きの影響を受けるが、歩行時における各腕体7、7は、一般に胸部4の軸心に対して対称的な位置関係になるので、上部部38の重心G4の位置はさほど変動せず、例えば直立姿勢状態における上部部38の重心G4の位置とほぼ同一となる。

【0090】また、本実施形態では、各剛体相当部(各脚体2の大腿部9及び下腿部11、腰部3、上部部38)の重心G1、G2、G3、G4の位置を表すデータの他、各剛体相当部の重量のデータや、各剛体相当部のサイズのデータ(例えば各剛体相当部の長さのデータ)があらかじめ求められて、演算処理装置16に記憶保持されている。

【0091】尚、下腿部11の重量は、足平部13を含めた重量である。また、上述のように演算処理装置16にあらかじめ記憶保持したデータは、実測等により求めておいてもよいが、人間1の身長や体重から、人間の平

均的な統計データに基づいて推測するようにしてもよい。一般に、上記各剛体相当部の重心G1、G2、G3、G4の位置や、重量、サイズは、人間の身長や体重と相関性があり、その相関関係に基づいて、人間の身長及び体重のデータから、上記各剛体相当部の重心G1、G2、G3、G4の位置や、重量、サイズを比較的精度よく推測することが可能である。

【0092】前記各部重心位置算出手段29は、上述のように演算処理装置16にあらかじめ記憶保持したデータと、前記胸部傾斜角度計測手段25及び腰部傾斜角度計測手段26によりそれぞれ求められた胸部4の傾斜角度 θ_a (=上部部38の傾斜角度)及び腰部3の傾斜角度 θ_b の今回値と、前記脚体姿勢算出手段28により求められた各脚体2の大腿部9及び下腿部11のそれぞれの傾斜角度 θ_c 、 θ_d の今回値とから、腰部3に固定された原点Oを有する身体座標系Cp(図4のxyz座標)での各剛体相当部の重心G1、G2、G3、G4の位置を求める。

【0093】この場合、各剛体相当部(各脚体2の大腿部9及び下腿部11、腰部3、上部部38)の傾斜角度 $\theta_a \sim \theta_d$ が上述のように求められているので、その傾斜角度 $\theta_a \sim \theta_d$ のデータと、各剛体相当部のサイズのデータとから身体座標系Cpにおける各剛体相当部の位置及び姿勢が判る。従って、身体座標系Cpにおける各剛体相当部の重心G1、G2、G3、G4の位置が求められることとなる。

【0094】具体的には、例えば図4を参照して、同図4の左側に位置する脚体2に関し、大腿部9の身体座標系Cpにおける傾斜角度(z軸方向に対する傾斜角度)は θ_c (この場合、図4では $\theta_c < 0$ である)であるので、身体座標系Cpにおける大腿部9の重心G1の位置の座標は、($t_1 \cdot \sin \theta_c$, $-t_1 \cdot \cos \theta_c$)となる。また、下腿部11の身体座標系Cpにおける傾斜角度は θ_d (図4では $\theta_d < 0$)であるので、身体座標系Cpにおける下腿部11の重心G2の位置の座標は、大腿部9の長さを L_c とすると、($L_c \cdot \sin \theta_c + t_2 \cdot \sin \theta_d$, $-L_c \cdot \cos \theta_c - t_2 \cdot \cos \theta_d$)となる。他の脚体2の大腿部9及び下腿部11並びに、腰部3及び上部部38の重心についても上記と同様に求められる。

【0095】このようにして、各部重心位置算出手段29により、身体座標系Cpにおける各剛体相当部の重心G1、G2、G3、G4の位置を求めた後、演算処理装置16は、前記身体重心位置算出手段30の処理実行し、各剛体相当部の重心G1、G2、G3、G4の位置のデータと、各剛体相当部の重量のデータとを用いて身体座標系Cpにおける人間1の身体重心G0の位置(x_g , z_g)を求める。

【0096】ここで、身体座標系Cpにおける腰部3の重心G3の位置及び重量をそれぞれ(x_3 , z_3)、 m_3 、上部部38の重心G4の位置及び重量をそれぞれ(x_4 , z_4)、 m_4 、人間1の前方に向かって左側の脚体2の大腿部9の重心G1の位置及び重量をそれぞれ(x_{1L} , z_{1L})、 m_{1L} 、

同脚体 2 の下腿部 11 の重心 G_2 の位置及び重量をそれぞれ (x_{2L} , z_{2L})、 m_{2L} 、右側の脚体 2 の大腿部 9 の重心 G_1 の位置及び重量をそれぞれ (x_{1R} , z_{1R})、 m_{1R} 、同脚体 2 の下腿部 11 の重心 G_2 の位置及び重量をそれぞれ (x_2 , z_2)、 m_2 、人間 1 の体重を M ($=m_{1L}+m_{2L}+m_{1R}+m_{2R}$) とすると、身体座標系 C_p における人間 1 の身体重心 G_0 の位置 (x_q , z_q) は次式 (9) により求められる。

$$x_q = (m_{1L} \cdot x_{1L} + m_{1R} \cdot x_{1R} + m_{2L} \cdot x_{2L} + m_{2R} \cdot x_{2R} + m_3 \cdot x_3 + m_4 \cdot x_4) / M$$

$$z_q = (m_{1L} \cdot z_{1L} + m_{1R} \cdot z_{1R} + m_{2L} \cdot z_{2L} + m_{2R} \cdot z_{2R} + m_3 \cdot z_3 + m_4 \cdot z_4) / M$$

…… (9)

【0098】このようにして身体重心位置算出手段 30 の処理を実行した後、さらに、演算処理装置 16 は、前記身体重心加速度算出手段 32 の処理と、前記足首位置算出手段 31 の処理とを実行する。

【0099】この場合、身体重心加速度算出手段 32 の処理では、まず、前記サイクルタイム毎に身体重心位置算出手段 30 により求められる身体座標系 C_p における身体重心 G_0 の位置 (x_q , z_q) の時系列データを用いて、身体座標系 C_p における身体重心 G_0 の位置 (x_q , z_q) の 2 階微分値、すなわち、身体座標系 C_p の原点 O に対する身体重心 G_0 の加速度 \ddot{x}_q ($d^2 x_q / dt^2$)、 \ddot{z}_q ($d^2 z_q / dt^2$) が求められる。そして、この加速度 \ddot{x}_q ($d^2 x_q / dt^2$)、 \ddot{z}_q ($d^2 z_q / dt^2$) と、前記基準加速度計測手段 27 により求められた身体座標系 C_p の原点 O の絶対座標系 C_f における加速度 $a_0 = \begin{pmatrix} a_{0x} \\ a_{0z} \end{pmatrix}$ とのベクトル和を求めることにより、絶対座標系 C_f における身体重心 G_0 の加速度 $a = \begin{pmatrix} a_x \\ a_z \end{pmatrix}$ が求められる。

【0100】また、前記足首位置算出手段 31 の処理では、まず、前記脚体姿勢算出手段 28 により求められた各脚体 2 の大腿部 9 及び下腿部 11 のそれぞれの傾斜角度 θ_c 、 θ_d のデータの今回値と、前記腰部傾斜角度計測手段 26 により求められた腰部 3 の傾斜角度 θ_b のデータの今回値と、該大腿部 9 及び下腿部 11 のサイズ (長さ) のデータとから、前記各部重心位置算出手段 29 の処理と同様の処理によって、前記身体座標系 C_p における各脚体 2 の足首部 12 の位置が求められる。具体的には、図 4 を参照して、同図 4 の左側に位置する脚体 2 に関し、下腿部 11 の長さ (膝関節 10 の中心から足首部 12 までの長さ) を L_d とすると、身体座標系 C_p における足首部 12 の位置の座標 (x_{12} , z_{12}) は、($L_c \cdot \sin \theta_c + L_d \cdot \sin \theta_d$, $-L_c \cdot \cos \theta_c - L_d \cdot \cos \theta_d$) となる (但し、図 4 では $\theta_c < 0$ 、 $\theta_d < 0$)。他方の脚体 2 についても同様である。

【0101】そして、この足首部 12 の身体座標系 C_p における位置 (x_{12} , z_{12}) と前記身体重心位置算出手段 30 により求められた身体座標系 C_p における身体重心 G_0 の位置 (x_q , z_q) のデータの今回値とから、身体重心 G_0 に対する各脚体 2 の足首部 12 の位置ベクトル $\begin{pmatrix} x_{12} - x_q \\ z_{12} - z_q \end{pmatrix}$ 、すなわち、前記式 (5) における ΔX_f , ΔZ_f , ΔX_r , ΔZ_r が求められる。

【0102】次に、演算処理手段 16 は、前記床反力推

定手段 36 の処理を次のように実行する。すなわち、この処理では、前記脚体運動判断手段 24 により今回のサイクルタイムで判断された脚体 2 の運動状態が単脚支持状態である場合には、人間 1 の体重 M 及び重力加速度 g の値 (これらはあらかじめ演算処理装置 16 に記憶されている) と、前記身体重心加速度算出手段 32 により求められた絶対座標系 C_f における身体重心 G_0 の加速度 $a = \begin{pmatrix} a_x \\ a_z \end{pmatrix}$ の今回値とから、前記式 (2) により、接地している脚体 2 に作用する床反力 $F = \begin{pmatrix} F_x \\ F_z \end{pmatrix}$ の推定値が求められる。尚、この場合、非接地側の脚体 2 (遊脚側の脚体 2) に作用する床反力は、 $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ である。

【0097】

【0103】また、脚体運動判断手段 24 により今回のサイクルタイムで判断された脚体 2 の運動状態が両脚支持状態である場合には、人間 1 の体重 M 及び重力加速度 g と、前記身体重心加速度算出手段 32 により求められた絶対座標系 C_f における身体重心 G_0 の加速度 $a = \begin{pmatrix} a_x \\ a_z \end{pmatrix}$ の今回値と、前記足首位置算出手段 31 により求められた各脚体 2 の足首部 12 の身体重心 G_0 に対する位置の今回値のデータ (式 (5) の ΔX_f , ΔZ_f , ΔX_r , ΔZ_r のデータの今回値) とから、前記式 (5) により、各脚体 2 毎の床反力 $F_f = \begin{pmatrix} F_{fx} \\ F_{fz} \end{pmatrix}$ 、 $F_r = \begin{pmatrix} F_{rx} \\ F_{rz} \end{pmatrix}$ の推定値が求められる。

【0104】一方、演算処理装置 16 は、上述のような身体重心位置算出手段 30、身体重心加速度算出手段 32、足首位置算出手段 31、及び床反力推定手段 36 の処理と並行して、前記脚体各部加速度算出手段 33、脚体各部角加速度算出手段 34、床反力作用点推定手段 35 の処理を実行する。

【0105】この場合、前記脚体各部加速度算出手段 33 の処理では、前記身体重心加速度算出手段 32 の処理と同様、まず、前記サイクルタイム毎に前記各部重心位置算出手段 29 により求められる身体座標系 C_p における各脚体 2 の剛体相当部である大腿部 9 及び下腿部 11 の重心 G_1 , G_2 の位置のそれぞれの時系列データを用いて、身体座標系 C_p における大腿部 9 及び下腿部 11 の重心 G_1 , G_2 の位置のそれぞれの 2 階微分値、すなわち、身体座標系 C_p における大腿部 9 及び下腿部 11 の重心 G_1 , G_2 のそれぞれの加速度 (身体座標系 C_p の原点 O に対する加速度) が求められる。そして、このそれぞれの加速度と、前記基準加速度計測手段 27 による腰部 3 の絶

対座標系C fにおける加速度 $a_0 = {}^T(a_0 x, a_0 z)$ とのベクトル和を求めることにより、絶対座標系C fにおける大腿部9及び下腿部11のそれぞれの加速度(より詳しくは、該加速度の絶対座標系C fにおける座標成分)が求められる。

【0106】また、前記脚体各部角加速度算出手段34の処理では、前記サイクルタイム毎に前記脚体姿勢算出手段28により求められる各脚体2の大腿部9及び下腿部11のそれぞれの傾斜角度 θc 、 θd の時系列データを用いて、該大腿部9及び下腿部11のそれぞれ傾斜角度 θc 、 θd の2階微分値、すなわち、大腿部9及び下腿部11のそれぞれの角加速度が求められる。

【0107】また、床反力作用点推定手段35の処理では、接地している脚体2について、例えば前記脚体姿勢算出手段28により求められた大腿部9の傾斜角度 θc の今回値から、図5及び図6に示すようにあらかじめ定められた相関関係に基づいて該脚体2の足首部12から、該脚体2の足平部13の床反力作用点(足平部13の接地箇所)に作用する全床反力が集中するとみなせる点)へのベクトル(足首部12に対する床反力作用点の位置ベクトル。以下、床反力作用点ベクトルという)を該床反力作用点の位置を表すデータとして求める。

【0108】すなわち、本願発明者の知見によれば、接地している脚体2の大腿部9の傾斜角度 θc や膝関節10の屈曲角度 $\Delta\theta d$ は、床反力作用点と比較的顕著な相関性を有し、例えば大腿部9の傾斜角度 θc に対して、前記床反力作用点ベクトル、詳しくは、人間1の進行方向(X軸方向)における該床反力作用点ベクトルの成分と、鉛直方向(Z軸方向)における該床反力作用点ベクトルの成分とは、それぞれ図5、図6に示すように変化する。ここで、大腿部9の負の傾斜角度 θc は、脚体2が人間1の後側に延びるように大腿部9が腰部3の軸心に対して傾斜しているとき(例えば図2の人間1の前方に向かって右側の脚体2)の角度であり、正の傾斜角度 θc は、脚体2が人間1の前側に存するように大腿部9が腰部3の軸心に対して傾斜しているとき(例えば図2の人間1の前方に向かって左側の脚体2)の角度である。

【0109】そこで、本実施形態では、図5及び図6の相関関係を表す、大腿部9の傾斜角度 θc をパラメータとする近似式を作成して、この近似式を演算処理装置16にあらかじめ記憶保持させている。そして、前記床反力作用点推定手段35の処理では、前記脚体姿勢算出手段28により求められた大腿部9の傾斜角度 θc の今回値を上記近似式に代入して、前記床反力作用点ベクトル(詳しくは該床反力作用点ベクトルのX軸方向、Z軸方向の成分)を求めている。

【0110】ここで、図5及び図6のように、大腿部9の傾斜角度 θc が極小値を持つ相関関係では、大腿部9の傾斜角度 θc が同一であっても傾斜角度 θc の減少過程

と増加過程とで床反力作用点ベクトルの値が異なる。そこで、本実施形態では、上記近似式を作成する際、足平部13の踵が着床してからつま先が離床するまでの前記相関関係の推移を、大腿部9の傾斜角度 θc が正である第1の相(図5ではa1の相、図6ではb1の相)と、大腿部9の傾斜角度 θc が負で、且つ、大腿部9の傾斜角度 θc の変化速度、即ち、大腿部9の傾斜角速度が負である第2の相(図5ではa2の相、図6ではb2の相)と、大腿部9の傾斜角度 θc が負で、且つ、大腿部9の傾斜角速度が正である第3の相(図5ではa3の相、図6ではb3の相)とに区分し、床反力作用点ベクトルのX軸方向成分、Z軸方向成分のそれぞれについて、各相を同一または異なる関数で近似するようにした。図5の相関関係における第1および第2の相a1、a2を合わせた相の近似式は、床反力作用点ベクトルのX軸方向成分を p_x として、例えば、

$$p_x = x_1 \cdot \theta c^6 + x_2 \cdot \theta c^5 + x_3 \cdot \theta c^4 + x_4 \cdot \theta c^3 + x_5 \cdot \theta c^2 + x_6 \cdot \theta c + x_7$$

という形の6次の多項式関数($x_1 \sim x_7$ は定数値)により表される。また、図5の相関関係における第3の相a3の近似式は、例えば

$$p_x = x_8 \cdot \theta c^4 + x_9 \cdot \theta c^3 + x_{10} \cdot \theta c^2 + x_{11} \cdot \theta c + x_{12}$$

という形の4次の多項式関数($x_8 \sim x_{12}$ は定数値)により表される。

$$p_z = z_1 \cdot \theta c^6 + z_2 \cdot \theta c^5 + z_3 \cdot \theta c^4 + z_4 \cdot \theta c^3 + z_5 \cdot \theta c^2 + z_6 \cdot \theta c + z_7$$

という形の6次の多項式関数($z_1 \sim z_7$ は定数値)により表される。また、図6の相関関係における第3の相b3の近似式は、例えば

$$p_z = z_8 \cdot \theta c^3 + z_9 \cdot \theta c^2 + z_{10} \cdot \theta c + z_{11}$$

という形の3次の多項式関数($z_8 \sim z_{11}$ は定数値)により表される。

【0112】そして、床反力作用点ベクトルを求める際は、大腿部9の傾斜角度 θc の正負を識別すると共に、大腿部9の傾斜角度 θc の時系列データの一階微分で算出される大腿部9の傾斜角速度の正負を識別する。さらに、これらの識別された傾斜角度 θc の正負と傾斜角速度の正負とから現在どの相に存するかを判別して、判別された相の近似式に大腿部9の傾斜角度 θc の今回値を代入することにより床反力作用点ベクトルを算出する。これにより、大腿部9の傾斜角度 θc の減少過程での床反力作用点ベクトルの値と増加過程での床反力作用点ベクトルの値とを区別して算出することができる。

【0113】尚、本実施形態では、脚体2の大腿部9の傾斜角度 θc と床反力作用点ベクトルとの相関関係を多項式で近似して、床反力作用点ベクトルを求めるようにしたが、図5及び図6に示した相関関係をデータテーブル

ルにより記憶保持しておき、そのデータテーブルを用いて、大腿部9の傾斜角度 θ_c から床反力作用点ベクトルを求めるようにすることも可能である。

【0114】また、床反力作用点の位置は、接地している脚体2の膝関節10の屈曲角度との相関性もあり、大腿部9の傾斜角度 θ_c の代わりに、膝関節角度センサ23で計測される膝関節10の屈曲角度 $\Delta\theta$ から、床反力作用点の位置を推定するようにしてもよく、あるいは、大腿部9の傾斜角度 θ_c と膝関節10の屈曲角度 $\Delta\theta$ との両者を用いて、マップ等により床反力作用点の位置を推定するようにしてもよい。

【0115】さらに、人間1が椅子に座るときや椅子に座っている状態から立ち上がるときは、床反力作用点の位置と膝関節10の屈曲角度 $\Delta\theta$ との間に図7（椅子座り時）、図8（椅子立ち時）に示す相関関係が成立し、階段を上るときや下るときは、床反力作用点の位置と大腿部9の傾斜角度 θ_c との間に図9（階段上り時）、図10（階段下り時）が成立する。従って、椅子に座ったり立ち上がるときは、膝関節10の屈曲角度 $\Delta\theta$ から図7、図8の相関関係に基づいて床反力作用点の位置を推定でき、また、階段を上り下りするときは、大腿部9の傾斜角度 θ_c から図9、図10の相関関係に基づいて床反力作用点の位置を推定できる。

【0116】上記の如く床反力作用点の位置を推定した*

$${}^T(m_k \cdot a_k x, m_k \cdot a_k z) = {}^T(F_1 x - F_2 x, F_1 z - F_2 z - m_k \cdot g)$$

$$\text{ゆえに、} {}^T(F_2 x, F_2 z) = {}^T(F_1 x - m_k \cdot a_k x, F_1 z - m_k \cdot a_k z - m_k \cdot g)$$

$$\dots\dots (10)$$

【0119】ここで、下腿部11の重心G2の加速度 ${}^T(a_k x, a_k z)$ は、前記脚体各部加速度算出手段33により求められるものである。また、下腿部11の先端部の足首部12に作用する関節反力 ${}^T(F_1 x, F_1 z)$ は、近似的には、該下腿部11を有する脚体2について前記床反力推定手段36により求められる床反力の推定値に等しい。より詳しくは、単脚支持状態において、該脚体2が接地しているときには、関節反力 ${}^T(F_1 x, F_1 z)$ は、前記式(2)により求められる床反力 ${}^T(F_x, F_z)$ であり、該脚体2が遊脚側の脚体であるときには、 ${}^T(F_1 x, F_1 z) = {}^T(0, 0)$ である。また、両脚支持状態において、該脚体2が人間1の進行方向前方に向かって後側の脚体であるときには、関節反力 ${}^T(F_1 x, F_1 z)$ は、前記式(5)の床反力 ${}^T(F_{rx}, F_{rz})$ であり、該脚体2が前側の脚体であるときには、前記式(5)の床反力 ${}^T(F_{fx}, F_{fz})$ である。

【0120】従って、各脚体2の膝関節10に作用する*

$$I_{k2} \cdot \alpha_2 = M_k - M_k + F_1 x \cdot t_2' \cdot \cos \theta d - F_1 z \cdot t_2' \cdot \sin \theta d \\ + F_2 x \cdot t_2 \cdot \cos \theta d - F_2 z \cdot t_2 \cdot \sin \theta d$$

ゆえに

$$M_k = M_k - I_{k2} \cdot \alpha_2 + F_1 x \cdot t_2' \cdot \cos \theta d - F_1 z \cdot t_2' \cdot \sin \theta d \\ + F_2 x \cdot t_2 \cdot \cos \theta d - F_2 z \cdot t_2 \cdot \sin \theta d \\ \dots\dots (11)$$

* 後、次に、演算処理装置16は、前記関節モーメント推定手段37の処理を実行して、各脚体2の膝関節10及び股関節8に作用するモーメントを求める。この処理は、前記床反力推定手段36、脚体各部加速度算出手段33、脚体各部角加速度算出手段34、床反力作用点推定手段35、及び脚体姿勢算出手段28によりそれぞれ求められたデータの今回値を用いて、所謂逆力学モデルに基づいて行われる。この逆力学モデルは、人間1の各剛体相当部の並進運動に関する運動方程式と回転運動に関する運動方程式とを用いて、床反力作用点により近い関節から順番に該関節に作用するモーメントを求めるものであり、本実施形態では、各脚体2の膝関節10、股関節8に作用するモーメントが順番に求められる。

【0117】さらに詳細には、図11を参照して、まず、各脚体2の下腿部11に関し、下腿部11の先端部の足首部12に作用する力（関節反力）、下腿部11の膝関節10の部分に作用する力（関節反力）、及び下腿部11の重心G2の並進加速度を、それぞれ絶対座標系Cfにおける成分表記によって、 ${}^T(F_1 x, F_1 z)$ 、 ${}^T(F_2 x, F_2 z)$ 、 ${}^T(a_k x, a_k z)$ とし、該下腿部11の重量を m_k とする。このとき、下腿部11の重心G2の並進運動に関する運動方程式は、次式(10)となる。

【0118】

* 関節反力 ${}^T(F_2 x, F_2 z)$ は、脚体各部加速度算出手段33により求められた下腿部11の重心G2の加速度 ${}^T(a_k x, a_k z)$ のデータと、床反力推定手段36により求められる床反力 $(= {}^T(F_1 x, F_1 z))$ のデータと、下腿部11のあらかじめ求められた重量 m_k のデータと、重力加速度 g の値とから、上記式(10)により求められる。

【0121】また、図11を参照して、下腿部11の先端部の足首部12に作用するモーメントを M_1 、下腿部11の膝関節10の部分に作用するモーメントを M_2 、下腿部11の重心G2の回りの慣性モーメントを I_{k2} 、下腿部11の重心G2の回りの角加速度を α_2 とする。また、前記図4に対応させて、下腿部11の重心G2と膝関節10の中心との間の距離を t_2 、下腿部11の重心G2と足首部12との間の距離を t_2' ($= l_d - t_2$) とすると、下腿部11の重心G2の回りの回転運動に関する運動方程式は、次式(11)となる。

【0122】

【0123】ここで、式(11)中の M_k は、同式(11)に係わる下腿部11を有する脚体2について前記床反力作用点推定手段35により求められる床反力作用点ベクトルと、該脚体2について前記床反力推定手段36により求められる床反力ベクトルとの外積(ベクトル積)として得られるモーメントである。また、 α_2 は、前記脚体各部角加速度算出手段34により求められる下腿部11の角加速度である。また、 θd は前記脚体姿勢算出手段28により求められる下腿部11の傾斜角度である。また、 (F_x, F_z) は、前述の通り、床反力推定手段36により求められる床反力の推定値である。さらに、 (F_x, F_z) は、前記式(10)により求められるものである。また、慣性モーメント I_{k2} は下腿部11の重量 m_k やサイズのデータ等と共に、あらかじめ求められて演算処理装置16に記憶されるものである。

【0124】従って、膝関節10に作用するモーメント M_k は、床反力推定手段36による床反力の推定値のデータと、床反力作用点推定手段35による床反力作用点ベクトルのデータと、脚体各部角加速度算出手段34によ

$$(F_x, F_z) = (F_x - m_k \cdot a_x, F_z - m_k \cdot a_z - m_k \cdot g)$$

..... (12)

【0128】ここで、 (F_x, F_z) は、先に前記式(10)により求めた膝関節10の関節反力である。また、 (a_x, a_z) は、前記脚体各部角加速度算出手段33により求められる大腿部9の重心G1の絶対座標系Cfにおける加速度(並進加速度)である。また、 m_k はあらかじめ求めた大腿部9の重量、 g は重力加速度である。 ※

$$M_k = M_k - I_{k1} \cdot \alpha_1 + F_x \cdot t_1' \cdot \cos \theta_c - F_z \cdot t_1' \cdot \sin \theta_c + F_x \cdot t_1 \cdot \cos \theta_c - F_z \cdot t_1 \cdot \sin \theta_c$$

..... (13)

【0131】ここで、 M_k は、前記式(11)により求められた膝関節10のモーメント、 (F_x, F_z) は、前記式(10)により求められた膝関節10の関節反力、 (F_x, F_z) は、前記式(12)により求められた股関節8の関節反力、 I_{k1} は、あらかじめ求めた大腿部9の重心G1の回りの慣性モーメント、 α_1 は前記脚体各部角加速度算出手段34により求められる大腿部9の角加速度、 θ_c は前記脚体姿勢算出手段28により求められる大腿部9の傾斜角度である。また、 t_1 は、股関節8の中心から大腿部9の重心G1までの距離(図4参照)、 t_1' は、膝関節10の中心から大腿部9の重心G1までの距離(図4では $L_c - t_1$)であり、これらは、あらかじめ求めた重心G1の位置や大腿部9のサイズ(長さ)から定まるものである。

【0132】以上説明した処理が、前記演算処理装置16のサイクルタイム毎に逐次実行され、各脚体2に作用する床反力や、各脚体2の膝関節10及び股関節8に作用するモーメントが逐次リアルタイムで推定される。

【0133】尚、本明細書での詳細な説明は省略するが、求められた膝関節10や股関節8のモーメントの推

* 下腿部11の角加速度 α_2 のデータと、脚体姿勢算出手段28による下腿部11の傾斜角度 θd のデータと、前記式(10)により求められた関節反力 (F_x, F_z) のデータと、あらかじめ求めた下腿部11の慣性モーメント I_{k2} 、サイズ(L_d)、重心G2の位置(t_2)のデータとから前記式(11)により求められる。

【0125】関節モーメント推定手段37は、上記のようにして下腿部11の膝関節10の部分に作用するモーメント M_k を求めた後、その算出処理と同様の処理によって、大腿部9の股関節8の部分に作用するモーメントを求める。この処理の基本的な考え方は、膝関節10のモーメント M_k を求める手法と同一であるので、詳細な図示及び説明は省略するが、その概要は次の通りである。

【0126】すなわち、まず、大腿部9の重心G1(図4参照)の並進運動に関する運動方程式に基づく次式(12)(前記式(10)と同じ形の式)により、大腿部9の股関節8の部分に作用する関節反力 (F_x, F_z) が求められる。

【0127】

※ 【0129】次いで、大腿部9の重心G1の回りの回転運動に関する運動方程式に基づく次式(13)(前記式(11)と同じ形の式)により、大腿部9の股関節8の部分に作用するモーメント M_k が求められる。

【0130】

定値は、例えば人間1の歩行を補助する装置(膝関節10や股関節8に補助トルクを付与可能な電動モータ等を含む装置)の制御に用いられる。

【0134】前述した演算処理装置16の処理により求められた床反力の推定値(詳しくは、該床反力の推定値の絶対値)の経時変化の様子を図12~図14に実線で例示する。また、演算処理装置16の処理により求められた膝関節10及び股関節8のモーメントの推定値の経時変化の様子を図15に実線で例示する。ここで、図12及び図15は、人間1が平地をほぼ一定速度で歩行した場合の例示、図13は人間1が階段を歩行して昇った場合の例示、図14は人間1が椅子に座った状態から立ち上がった場合の例示である。この場合、図12~図14では、フォースメータ等を用いて床反力を実測した比較例(床反力の真値に相当するもの)が仮想線で併記されている。また、図15ではトルクメータ等を用いて膝関節10及び股関節8のモーメントを実測した比較例(膝関節10及び股関節8のモーメントの真値に相当するもの)が仮想線で併記されている。

【0135】図12~図14を参照して明らかなよう

に、本実施形態によれば、脚体2の運動形態や運動環境によらずに精度のよい床反力の推定値が得られていることが判る。また、本実施形態ではこの床反力の推定値を用いることによって、図15に示されるように、膝関節10や股関節8のモーメントも比較的精度よく推定することができる。

【0136】以上のように、本実施形態によれば、脚体2に人間1の歩行の邪魔となったり、脚体2の運動に負担がかかるようなセンサを装着したりすることなく、股関節8や股関節8に装着した角度センサ22、23や、胴体5に装備したジャイロセンサ14、19及び加速度センサ15、20、21というような比較的小型で軽量のセンサを用いて各脚体2に作用する床反力や、各脚体2の股関節8及び膝関節10に作用するモーメントをリアルタイムで容易に推定することができる。しかも、その推定を、平地での歩行、階段での歩行等、脚体2の運動形態や運動環境によらずに比較的精度よく行うことができる。

【0137】尚、以上説明した実施形態では、本発明を人間1に適用した場合を例にとって説明したが、二足歩行移動体としての二足歩行ロボットにも本発明を適用することができる。ここで、二足歩行ロボットでは、腰部と胸部とが一体的な構造となっている場合があるが、この場合には、ジャイロセンサや前後方向の加速度センサを腰部及び胸部のいずれか一方だけに取り付けて、床反力や脚体の関節のモーメントを本実施形態と同様に推定するようにすることも可能である。また、二足歩行ロボットでは、股関節や膝関節の屈曲角度は、それらの関節のアクチュエータに対する制御装置の制御量により把握するようにすることも可能である。

【0138】また、前記実施形態では、脚体2の運動状態を判断するために、腰部上下加速度センサ21の検出データをそのまま用いたが、該検出データの代わりに、例えば前記基準加速度計測手段27により求められる絶対座標系Cfでの腰部3の加速度 a_0 の鉛直方向（Z軸方向）の成分の値を用いるようにしてもよい。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の床反力推定方法の基本的原理を説明するための図。

【図2】本発明の一実施形態における二足歩行移動体としての人間と該人間に装備する装置構成を模式化して示す図。

【図3】図2の装置に備える演算処理装置の機能を説明するためのブロック図。

【図4】図3の演算処理装置の処理に用いる剛体リンクモデルを示す図。

【図5】通常歩行時における床反力作用点ベクトルの進行方向成分と大腿部の傾斜角度との相関関係を示す線図。

【図6】通常歩行時における床反力作用点ベクトルの鉛直方向成分と大腿部の傾斜角度との相関関係を示す線図。

【図7】椅子座り時における床反力作用点ベクトルの進行方向成分と膝関節の屈曲角度との相関関係を示す線図。

【図8】椅子立ち上がり時における床反力作用点ベクトルの進行方向成分と膝関節の屈曲角度との相関関係を示す線図。

【図9】階段上り時における床反力作用点ベクトルの進行方向成分と大腿部の傾斜角度との相関関係を示す線図。

【図10】階段下り時における床反力作用点ベクトルの進行方向成分と大腿部の傾斜角度との相関関係を示す線図。

【図11】図3の演算処理装置の関節モーメント推定手段における処理を説明するための図。

【図12】本発明の実施形態により求められた通常歩行時の床反力の推定値の経時変化の様子を例示するグラフ。

【図13】本発明の実施形態により求められた階段上り時の床反力の推定値の経時変化の様子を例示するグラフ。

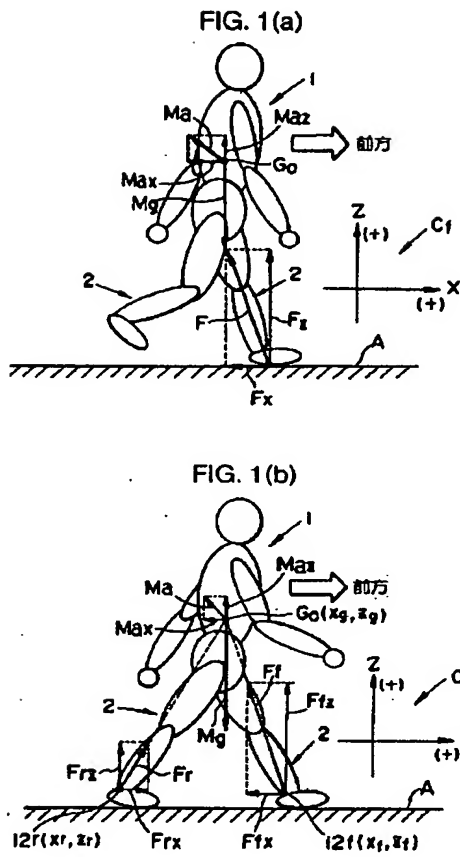
【図14】本発明の実施形態により求められた椅子立ち上がり時の床反力の推定値の経時変化の様子を例示するグラフ。

【図15】本発明の実施形態により求められた膝関節及び股関節のモーメントの推定値の経時変化の様子を例示するグラフ。

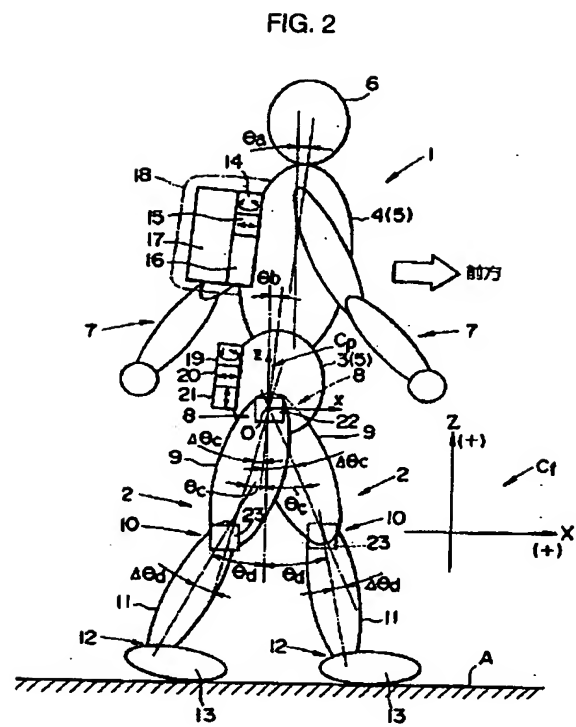
【符号の説明】

1…人間（二足歩行移動体）、2…脚体、3…腰部、4…胸部、5…胴体、8…股関節、9…大腿部、10…膝関節、11…下腿部、12…足首部（特定部位）、○…基準点。

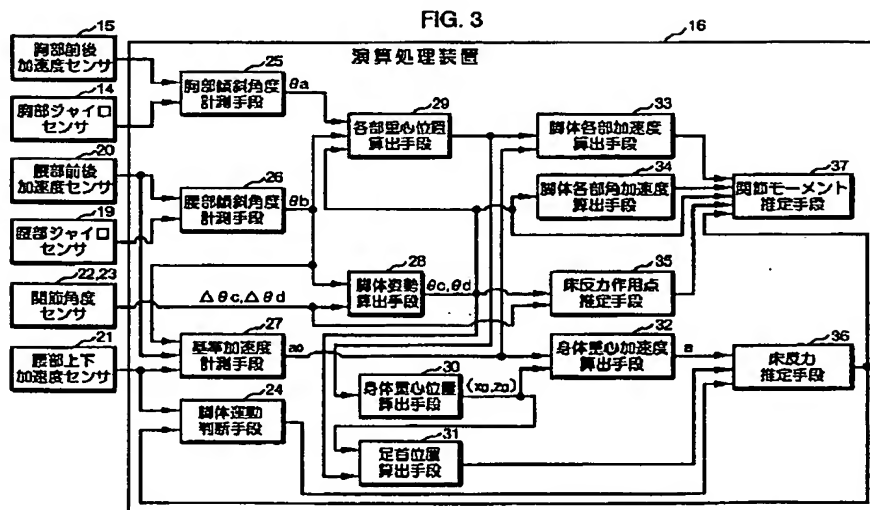
【図1】



【図2】

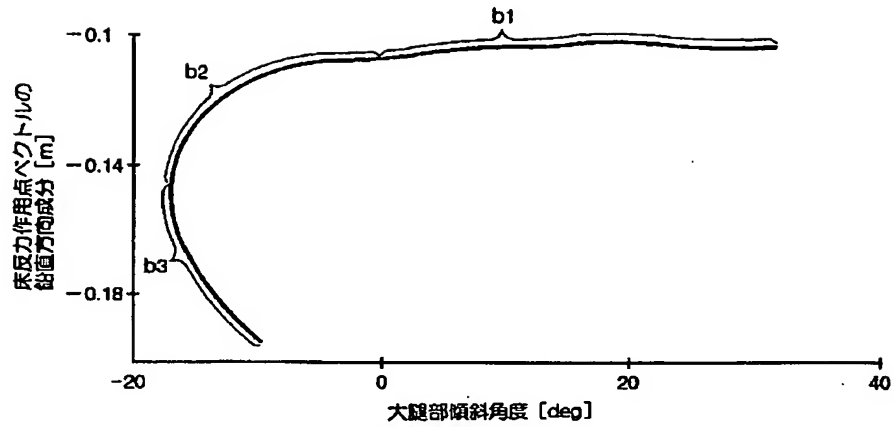


【図3】



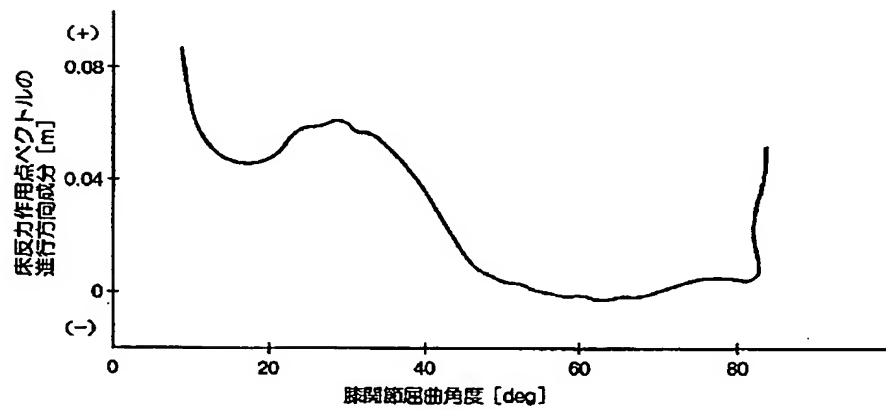
【図6】

FIG. 6



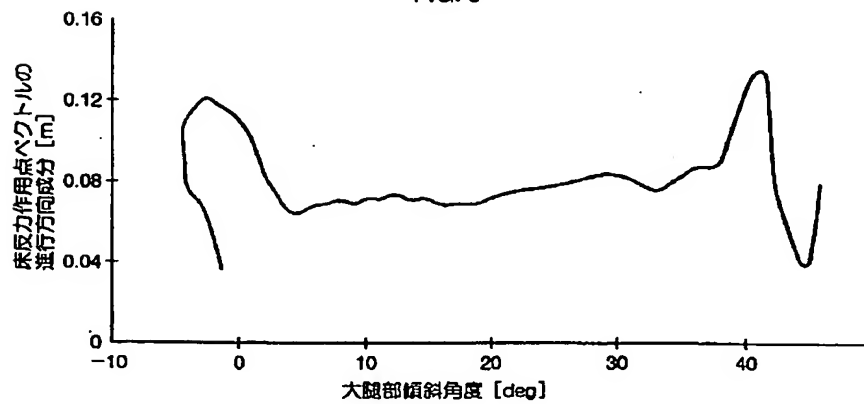
【図7】

FIG. 7



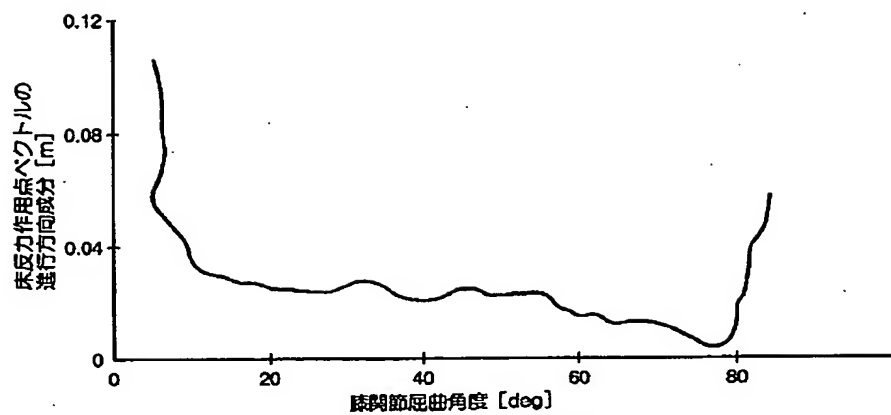
【図9】

FIG. 9



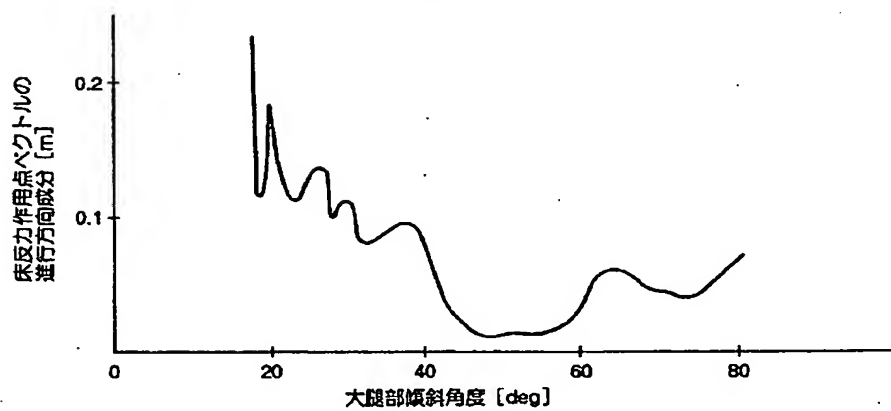
【図8】

FIG. 8

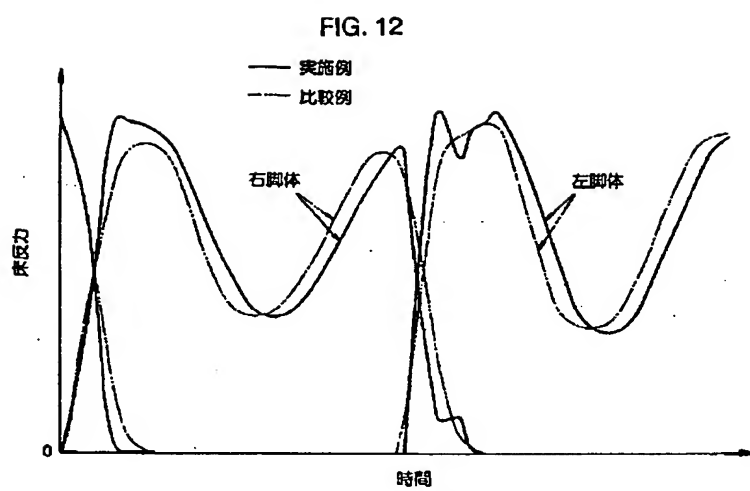


【図10】

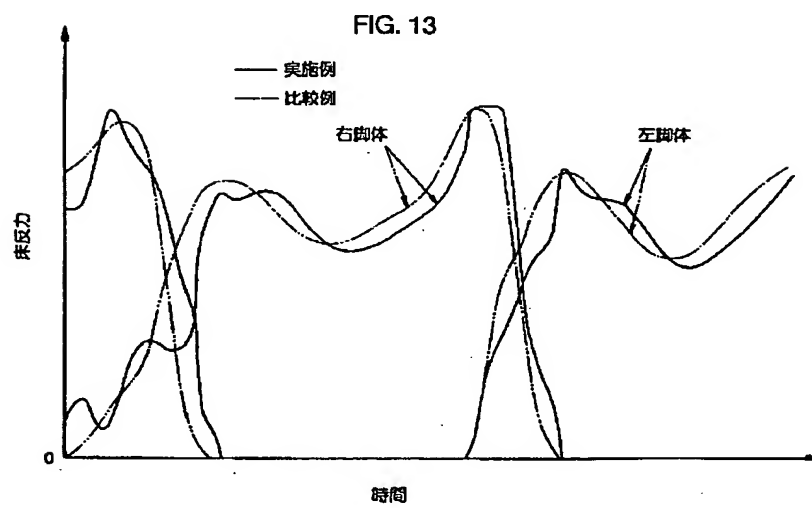
FIG.10



【図12】

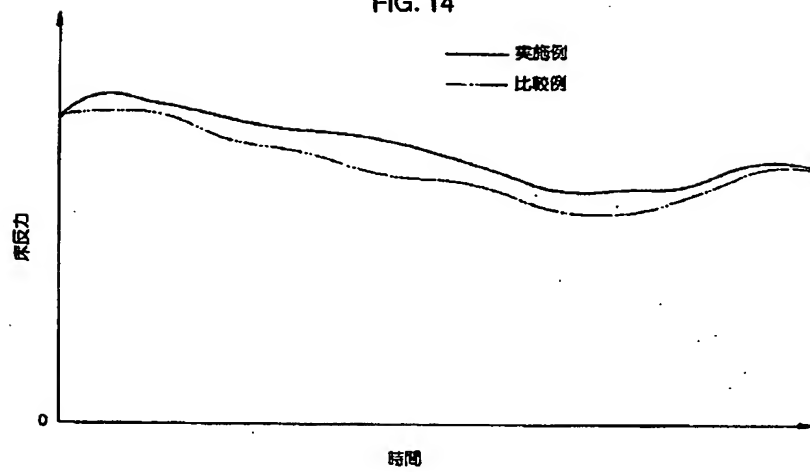


【図13】



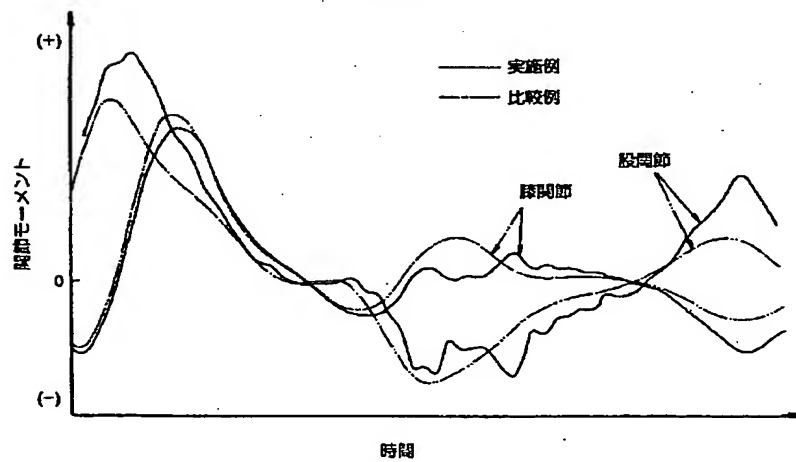
【図14】

FIG. 14



【図15】

FIG. 15



フロントページの続き

(72)発明者 加藤 久
埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会
社本田技術研究所内

Fターム(参考) 3C007 CS08 KS21 KS23 KS24 KS33
KX02 MT00 WA03 WA13